электрических цепей правилам Кирхгофа. В узлах, где сходятся несколько магнитопроводов, выполняется первое правило Кирхгофа

$$\sum_i \Phi_i = 0, \tag{34.20}$$

т. е. алгебраическая сумма магнитных потоков, сходящихся в узел, равна нулю.

Для замкнутых участков магнитной цепи, содержащих несколько магнитодвижущих сил $\mathscr{E}_{\text{м},j} = k \cdot 4\pi I_j w_j$ и несколько магнитных сопротивлений $R_{\text{м},i} = \frac{1}{\mu_i \mu_0} \frac{l_i}{S_i}$, которые пронизываются соответствующими магнитными потоками Φ_i, выполняется второе правило Кирхгофа

$$\sum_i \Phi_i R_{\text{м},i} = \sum_j \mathscr{E}_{\text{м},j} \tag{34.21}$$

— алгебраическая сумма произведений магнитных потоков на магнитные сопротивления последовательных участков замкнутого контура равна алгебраической сумме магнитодвижущих сил в этом контуре.

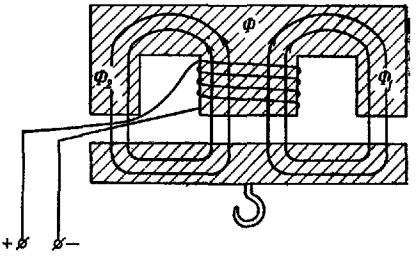

Рис. 3.34.

Для примера на рис. 3.34 приведен разветвленный контур, состоящий из электромагнита и якоря с воздушными зазорами. Как указывалось выше, при рассмотрении предыдущего примера, по мере уменьшения воздушного зазора уменьшается магнитное сопротивление цепи и возрастают магнитные потоки, магнитная индукция и намагниченность сердечника и якоря. Вследствие этого по мере приближения якоря к электромагниту резко возрастают силы притяжения между ними.

§ 35. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

Проводник с током, помещенный в магнитное поле, испытывает пондеромоторную силу. При перемещении проводника с током поле производит работу. Для вычисления этой работы рассмотрим линейный проводник длиной l с током I, перемещающийся в однородном магнитном поле $\mathbf{B} = \text{const}$. Расположение деталей прибора изображено на рис. 3.35, *а*; схема поля, тока, сил и перемещений приведена на рис. 3.35, *б*. Вектор **B** перпендикулярен к плоскости чертежа и направлен за эту плоскость, что изображено на чертеже крестиками. На элемент тока $I\mathbf{l}$ действует со стороны магнитного поля,

согласно (31.2), сила

$$F = k'IlB, \tag{35.1}$$

так как угол β между направлением тока и линиями индукции равен 90° и $\sin\beta = 1$.

Переместим провод параллельно самому себе на расстояние dx по направлению действия силы F. При этом магнитное поле совершит работу

$$dA = F\,dx = k'IBl\,dx = k'IB\,dS = k'I\,d\Phi,$$

так как $l\,dx = dS$ есть площадь, очерчиваемая проводом при его перемещении в магнитном поле, а $B\,dS = d\Phi$ — магнитный поток, пронизывающий эту площадь. Таким образом,

$$dA = k'I\,d\Phi, \tag{35.2}$$

т. е. работа, совершаемая проводником с током при перемещении его в магнитном поле, численно равна произведению тока I на магнитный поток $d\Phi$, *пересеченный движущимся проводником*.

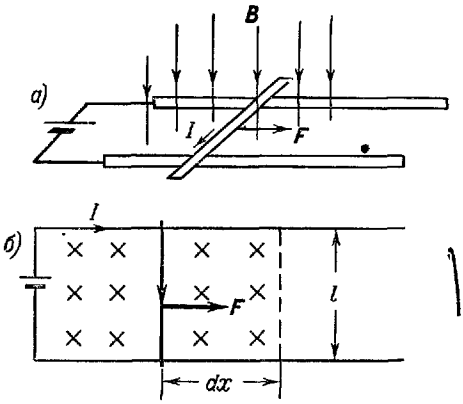

Рис. 3.35.

Формула (35.2) остается справедливой и в случае, если проводник движется не перпендикулярно к линиям магнитной индукции, а под некоторым углом к ним. В системе СГС ток I выражается в СГС ед. тока, магнитный поток $d\Phi$ — в *мкс* и работа dA — в *эрг*. В системе СИ ток выражается в *а*, магнитный поток — в *в·сек* (*вб*), $k' = 1$ и работа получается в *дж*.

Выведем теперь выражение для работы перемещения замкнутого контура с током в магнитном поле. Для упрощения вычислений рассмотрим прямоугольный контур с током *1 2 3 4 1*, плоскость которого перпендикулярна к линиям вектора магнитной индукции **B** (рис. 3.36). Линии индукции направлены за плоскость чертежа. Ток направлен по часовой стрелке, и магнитный поток Φ_1, сцепленный с контуром, положителен.

Переместим этот контур параллельно самому себе в новое положение *1′ 2′ 3′ 4′ 1′*. Магнитное поле в общем случае может быть неоднородным, и в новом положении с контуром будет сцеплен магнитный поток Φ_2. Проведем пунктирные линии *3 2′* и *4 1′*, вдоль которых двигались стороны контура. Эти линии выделяют площадку *3 2′ 1′ 4*, расположенную между старым и новым

положениями контура и пронизываемую некоторым магнитным потоком Φ'.

Полная работа A по перемещению контура в магнитном поле равна алгебраической сумме работ, совершенных магнитным полем по перемещению каждой из четырех сторон:

$$A = A_{1,2} + A_{2,3} + A_{3,4} + A_{4,1}. \qquad (35.3)$$

Величины $A_{2,3} = A_{4,1} = 0$, так как соответствующие стороны при своем перемещении очерчивают нулевую площадь и не перерезают магнитного потока. Сторона *3 4* пересекает поток $\Phi' + \Phi_2$, и

$$A_{3,4} = k'I(\Phi' + \Phi_2). \qquad (35.4)$$

Провод *1 2* пересекает поток $\Phi_1 + \Phi'$, но движется против сил действия магнитного поля, и

$$A_{1,2} = -k'I(\Phi_1 + \Phi'). \qquad (35.5)$$

Из (35.3)—(35.5) окончательно находим

$$A = k'I(\Phi_2 - \Phi_1). \qquad (35.6)$$

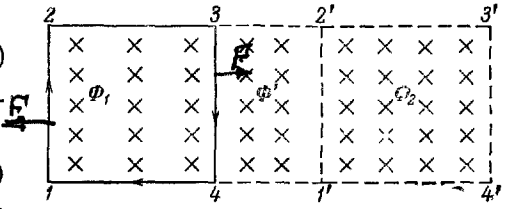

Рис. 3 36

Величина $\Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi$ представляет собой изменение магнитного потока, сцепленного с контуром. Для элементарного перемещения

$$dA = k'I\,d\Phi, \qquad (35.7)$$

т. е. работа dA, совершаемая при перемещении замкнутого контура с током в магнитном поле, численно равна произведению величины тока I на *изменение* магнитного потока, *сцепленного с контуром*. Формулы (35.2) и (35.7) внешне тождественны, но физический смысл величин $d\Phi$ в них существенно различен.

Соотношение (35.7), выведенное нами для простейшего случая, остается справедливым для контура любой формы в произвольном магнитном поле. Более того, *если контур неподвижен, а меняется вектор магнитной индукции (в результате перемещения источников магнитной индукции или изменения токов в них), то при изменении магнитного потока в контуре на величину $d\Phi$ магнитное поле совершает работу dA, рассчитываемую по той же формуле* (35.7).