

Переменные токи высокой частоты проходят только по очень тонкому поверхностному слою проводника. Для таких токов применяются проводники трубчатой формы. Их внешняя поверхность не должна иметь трещин, коррозии и других повреждений, так как это сильно влияет на сопротивление. Поэтому поверхность проводников, предназначенных для токов высокой частоты, часто покрывают тонким слоем серебра.

При нагреве сплошных проводников токами высокой частоты в результате скин-эффекта почти вся теплота выделяется в поверхностном слое. На этой основе В. П. Вологдин и другие разработали методы поверхностной закалки металлов, широко применяемые при изготовлении шестерен, коленчатых валов и других деталей машин, подвергающихся ударным нагрузкам.

§ 19.5. Взаимная индукция. Трансформатор

1. Явление взаимной индукции заключается в наведении э. д. с. индукции во всех проводниках, находящихся вблизи цепи переменного тока. Впервые это явление наблюдал Фарадей в опыте, изображенном на рис. 19.1. При изменении тока I_1 в первой цепи (с помощью ключа или реостата) во второй наводится э. д. с. взаимной индукции \mathcal{E}_2 и возникает индукционный ток. Из основного закона электромагнитной индукции (19.2) следует, что

$$\mathcal{E}_2 = -d\Phi_{m21}/dt, \quad (19.38)$$

где Φ_{m21} — магнитный поток сквозь поверхность второго контура, обусловленный магнитным полем тока, проходящего в первом контуре. Эту величину естественно назвать магнитным потоком взаимной индукции второго и первого контуров. В электротехнике ее называют потокоцеплением взаимной индукции (см. § 17.4).

2. В соответствии с законом Био — Савара — Лапласа индукция магнитного поля первого контура пропорциональна току I_1 . Путем рассуждений, аналогичных приведенным в начале предыдущего параграфа, можно показать, что магнитный поток Φ_{m21} пропорционален току I_1 :

$$\Phi_{m21} = M_{21} I_1, \quad (19.39)$$

где M_{21} — коэффициент пропорциональности, зависящий только от геометрической формы, размеров и взаимного расположения первого и второго контуров, а также от относительной магнитной проницаемости среды, в которой они находятся¹. Коэффициент M_{21} называется взаимной индуктивностью (статической взаимной индуктивностью) второго и первого контуров.

Из сопоставления формул (19.39) и (19.25) следует, что взаимная индуктивность двух контуров имеет такую же размерность и выражается в тех же единицах, что и индуктивность L .

¹ Предполагается, что контуры изолированы от влияния внешних магнитных полей, а среда однородна и изотропна.

Если источник тока отключить от первого контура и подключить ко второму, то в последнем возникнет ток I_2 . Магнитный поток Φ_{m12} , создаваемый током I_2 сквозь поверхность первого контура, выразится формулой, аналогичной (19.39):

$$\Phi_{m12} = M_{12} I_2, \quad (19.40)$$

где M_{12} — взаимная индуктивность первого и второго контуров.

3. В гл. XX показано, что относительная магнитная проницаемость всех веществ, за исключением ферромагнитных, не зависит от напряженности магнитного поля. Иными словами, их относительная магнитная проницаемость не зависит от того, какова сила тока, создающего магнитное поле. Можно показать, что для рассмотренных выше двух контуров, находящихся в неферромагнитной среде (воздухе, воде и т. д.), взаимные индуктивности M_{21} и M_{12} равны друг другу:

$$M_{21} = M_{12}. \quad (19.41)$$

В связи с этим величины M_{21} и M_{12} и были названы в з а и м н о й индуктивностью двух контуров.

Если среда ферромагнитна, то M_{21} и M_{12} зависят не только от геометрической формы, размеров и взаимного расположения контуров, но и от силы токов в них. В этом случае равенство (19.41) не соблюдается.

4. Окончательное выражение для э. д. с. взаимной индукции, возникающей во втором контуре при изменении в первом тока I_1 , можно найти, заменив в (19.38) Φ_{m21} его выражением по формуле (19.39):

$$\mathcal{E}_2 = - \frac{d}{dt} (M_{21} I_1) \quad (19.42)$$

Если форма, размеры и взаимное расположение контуров, а также относительная магнитная проницаемость среды постоянны, то $M_{21} = \text{const}$ и формулу (19.42) можно записать в виде

$$\mathcal{E}_2 = - M_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (19.43)$$

Если контуры 1 и 2 находятся в ферромагнитной среде, то M_{21} зависит от силы тока I_1 . Однако и в этом случае для э. д. с. \mathcal{E}_2 можно пользоваться формулой, аналогичной (19.43):

$$\mathcal{E}_2 = - \frac{d\Phi_{m21}}{dt} = - M_{21 \text{дин}} \frac{dI_1}{dt}, \quad (19.43')$$

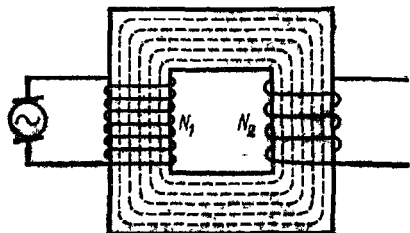


Рис. 19.16

где $M_{21 \text{дин}} = d\Phi_{m21}/dI_1$ — так называемая **динамическая взаимная индуктивность** второго и первого контуров.

5. На явлении взаимной индукции основано действие трансформаторов, служащих для повышения или понижения напряжения переменного тока. Принципиальная схема трансформатора приведена на

рис. 19.16. Трансформатор состоит из двух соленоидальных обмоток, укрепленных на общем замкнутом железном сердечнике. Концы первой обмотки присоединены к источнику переменного тока, а концы второй включены в цепь потребителей электрической энергии. Переменное магнитное поле тока I_1 в первой (первичной) обмотке трансформатора вызывает появление э. д. с. взаимной индукции во второй обмотке. Магнитное поле первичной обмотки практически полностью локализовано в железном сердечнике, играющем роль магнитной цепи. Поэтому применение в трансформаторе замкнутого сердечника, общего для обеих обмоток, позволяет резко увеличить магнитный поток взаимной индукции этих обмоток и их взаимную индуктивность.

6. Определим статическую и динамическую взаимные индуктивности обмоток трансформатора. По формулам (19.39) и (19.43'),

$$M_{21} = \frac{\Phi_{m21}}{I_1} \quad \text{и} \quad M_{21 \text{ дин}} = \frac{d\Phi_{m21}}{dI_1},$$

где Φ_{m21} — магнитный поток сквозь все витки вторичной обмотки.

По формуле Гопкинсона (16.27), магнитный поток в сердечнике трансформатора

$$\Phi_m = \mathcal{E}_m / R_m,$$

где \mathcal{E}_m — алгебраическая сумма магнитодвижущих сил, создаваемых токами в первичной и вторичной обмотках трансформатора, R_m — магнитное сопротивление сердечника.

Ограничимся рассмотрением холостого хода трансформатора, соответствующего его работе при разомкнутой вторичной цепи ($I_2 = 0$). При холостом ходе

$$\mathcal{E}_m = N_1 I_1,$$

где N_1 — число витков первичной обмотки. Поэтому

$$\Phi_m = \frac{N_1 I_1}{R_m} \quad \text{и} \quad \Phi_{m21} = N_2 \Phi_m,$$

где N_2 — число витков вторичной обмотки. Следовательно,

$$M_{21} = N_2 \frac{\Phi_m}{I_1}, \quad M_{21 \text{ дин}} = N_2 \frac{d\Phi_m}{dI_1}, \quad (19.44)$$

$$M_{21} = \frac{N_1 N_2}{R_m} \quad \text{и} \quad M_{21 \text{ дин}} = N_1 N_2 \frac{d}{dI_1} \left(\frac{I_1}{R_m} \right). \quad (19.45)$$

Статическая и динамическая индуктивности первичной обмотки трансформатора соответственно равны:

$$L_1 = N_1 \frac{\Phi_m}{I_1} = \frac{N_1^2}{R_m} \quad \text{и} \quad L_{1 \text{ дин}} = N_1 \frac{d\Phi_m}{dI_1} = N_1^2 \frac{d}{dI_1} \left(\frac{I_1}{R_m} \right). \quad (19.46)$$

7. Найдем отношение абсолютных значений разностей потенциалов $\Delta\varphi_2$ и $\Delta\varphi_1$ на концах вторичной и первичной обмоток при холостом ходе, называемое коэффициентом трансформации. По формуле (9.10') $\Delta\varphi_2$ при холостом ходе ($I_2 = 0$) равно э.д.с. взаимной индукции \mathcal{E}_2 :

$$\Delta\varphi_2 = \mathcal{E}_2 = -M_{21} \text{ дин} \frac{dI_1}{dt}. \quad (19.47)$$

Аналогично, $\Delta\varphi_1$ равно разности между э.д.с. \mathcal{E} источника электрической энергии и напряжением $I_1 r$ на его внутреннем сопротивлении r , т. е.

$$\Delta\varphi_1 = \mathcal{E} - I_1 r.$$

По закону Ома,

$$I_1 = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}_1}{R_1 + r} \quad \text{и} \quad \Delta\varphi_1 = I_1 R_1 - \mathcal{E}_1,$$

где R_1 — сопротивление первичной обмотки, \mathcal{E}_1 — э.д.с. самоиндукции в ней. Заменяв \mathcal{E}_1 ее выражением по формуле (19.30'), получим

$$\Delta\varphi_1 = I_1 R_1 + L_1 \text{ дин} \frac{dI_1}{dt}.$$

Для всех существующих трансформаторов первый член правой части этого равенства пренебрежимо мал по сравнению со вторым. Поэтому приближенно можно считать, что

$$\Delta\varphi_1 = L_1 \text{ дин} \frac{dI_1}{dt}. \quad (19.48)$$

Из соотношений (19.45)—(19.48) следует, что коэффициент трансформации при холостом ходе равен

$$\left| \frac{\Delta\varphi_2}{\Delta\varphi_1} \right| = \frac{M_{21} \text{ дин}}{L_1 \text{ дин}} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (19.49)$$

8. Трансформаторы чрезвычайно широко применяются в современной электро- и радиотехнике. Они позволяют сравнительно просто и с ничтожными потерями энергии изменять в нужных пределах напряжение переменного тока.

§ 19.6. Энергия магнитного поля электрического тока

1. Во всех выводах этого параграфа предполагается, что проводники с током находятся в не ферромагнитной однородной и изотропной среде.

В § 19.4 было показано, что при возрастании тока в контуре возникает э. д. с. самоиндукции, противодействующая увеличению тока. По закону Ома сила тока I в контуре с сопротивлением R и индуктивностью L равна

$$I = (\mathcal{E} + \mathcal{E}_c)/R,$$

где \mathcal{E} — э. д. с. источника электрической энергии, а \mathcal{E}_c — э. д. с. самоиндукции, которая по формуле (19.30) равна $\mathcal{E}_c = -L(dI/dt)$. Таким образом,

$$\mathcal{E} = IR + L(dI/dt).$$

Работа, совершаемая источником электрической энергии за время dt , равна

$$\mathcal{E} I dt = I^2 R dt + LI dl. \quad (19.50)$$