

Глава 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

§ 2.1. СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Открытие электрических колебаний

Колебания груза на пружине или маятника «открывать» было не нужно. Они наблюдаются повсеместно. С электрическими колебаниями дело было много сложнее.

Началось все с того, что в 1826 г. французский ученый Ф. Савар (один из авторов закона Био—Савара—Лапласа) заметил довольно странное явление. Стальная игла, помещенная внутрь соленоида, при разрядке лейденской банки через соленоид намагничивается иногда прямо противоположно тому, как это должно было бы быть, если бы банка постепенно разряжалась до нуля.

В 1842 г. опыты Савара повторил американский ученый югославского происхождения Дж. Генри и пришел к заключению, что разряд лейденской банки «не представляется... единственным переносом флюида* с одной обкладки банки на другую» и что необходимо допустить существование «главного разряда в одном направлении, а затем несколько отраженных действий назад и вперед, каждое из которых является более

* Флюидом в те времена называли электрический заряд.

слабым, чем предыдущее, продолжающимся до тех пор, пока не наступит равновесие».

Г. Гельмгольц в своем трактате «О сохранении силы» в 1847 г. также приходит на основании закона сохранения энергии к выводу, что разряд лейденской банки «не следует представлять как простое движение электричества в одном направлении, а как движение его туда и обратно между обеими обкладками конденсатора, как колебания, которые все более и более уменьшаются, пока вся живая сила (энергия по современной терминологии) не уничтожается суммой сопротивлений».

Убедительное доказательство колебательного разряда конденсатора (лейденской банки) получил в 1860 г. Ф. Феддерсон. Он наблюдал искровой разряд лейденской банки с помощью быстро вращающегося зеркала. В зеркале была видна не одна непрерывная светлая полоса от искры, а ряд чередующихся полос, отделенных темными промежутками. Это была фактически временная развертка быстрых колебаний.

Наблюдение свободных колебаний

Периодические или почти периодические изменения заряда, силы тока и напряжения называются электрическими колебаниями (иногда их называют электромагнитными).

Возбудить электрические колебания почти столь же просто, как и заставить тело колебаться, подвесив его на пружине. Но наблюдать электрические колебания, как об этом только что говорилось, уже не так просто. Мы непосредственно не видим ни перезарядки конденсатора, ни тока в катушке. К тому же колебания обычно происходят с очень большой частотой.

Для наблюдения и исследования электрических колебаний сейчас используют э л е к т р о н н ы й о с ц и л л о г р а ф.

В электронной трубке осциллографа узкий пучок электронов попадает на экран, способный светиться при бомбардировке его быстрыми электронами. На горизонтально отклоняющие пластины подается переменное напряжение u_p пилообразной формы (рис. 2.1). Его вырабатывает генератор развертки. Это на-



Рис. 2.1

пряжение сравнительно медленно нарастает, а потом очень резко уменьшается. Координата следа электронного луча на экране прямо пропорциональна напряжению на отклоняющих пластинах: $y \sim E \sim u_p(t)$. При линейном возрастании напряжения развертки со временем координата y светящейся точки на экране перемещается в горизонтальном направлении с постоянной скоростью, вычерчивая на экране прямую линию. При быстром возвращении напряжения к начальному луч практически мгновенно возвращается назад. После этого весь процесс повторяется.

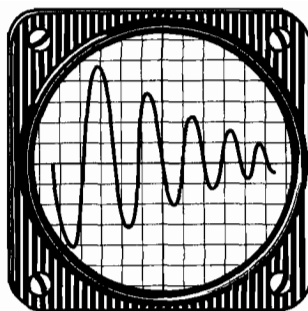


Рис. 2.2

Если присоединить вертикально отклоняющие пластины осциллографа к конденсатору, то колебания напряжения при его перезарядке вызовут колебания электронного луча в вертикальном направлении. В результате на экране образуется временная развертка затухающих колебаний (рис. 2.2), подобная той, которую вычерчивает маятник с песочницей на движущемся листе картона.

Эти электромагнитные колебания называются *свободными*. Они возникают в системе после того, как конденсатору сообщается электрический заряд, выводящий систему из состояния равновесия. Зарядка конденсатора эквивалентна смещению груза на пружине из положения равновесия.

Вынужденные колебания

Вынужденные электрические колебания возникают в электрической цепи под действием периодической электродвижущей силы. Переменную ЭДС можно получить в проводочной рамке из нескольких витков при вращении ее с постоянной угловой скоростью в постоянном магнитном поле (рис. 2.3). При этом маг-

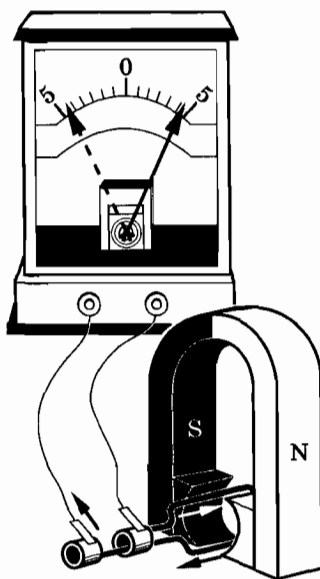


Рис. 2.3

нитный поток через поверхность рамки будет периодически меняться. Согласно закону электромагнитной индукции в рамке возникнет переменная ЭДС. При замыкании цепи через гальванометр пойдет переменный ток, и стрелка прибора начнет колебаться около положения равновесия.

§ 2.2. ПРОЦЕССЫ В КОЛЕБАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Простейшая система, в которой могут возникнуть свободные электрические колебания, состоит из конденсатора и катушки, соединенных последовательно (рис. 2.4). Такая система называется колебательным контуром.

Рассмотрим, почему в системе возникают колебания. Для наглядности будем сравнивать процессы в контуре с колебаниями шарика на пружине.

Зарядим конденсатор, присоединив его к батарее с помощью переключателя (рис. 2.5, а). При этом конденсатору сообщается энергия

$$W_p = \frac{q_m^2}{2C}, \quad (2.2.1)$$

где q_m — заряд конденсатора, а C — его емкость. Между обкладками конденсатора возникает разность потенциалов U_m .

В случае шарика на пружине это эквивалентно тому, что мы увеличили длину пружины на x_m , сообщив системе потен-

циальную энергию $\frac{kx_m^2}{2}$, но держим пока шарик рукой, не позволяя ему двигаться (рис. 2.5, б).

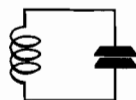


Рис. 2.4

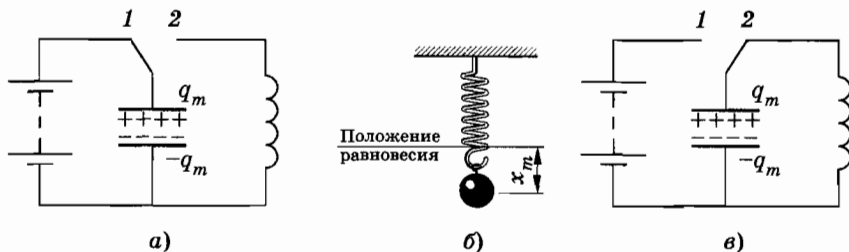


Рис. 2.5

Переведем переключатель в положение 2 (рис. 2.5, в). Конденсатор начнет разряжаться, и в цепи появится электрический ток. Сила тока равна $i = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = q'$ (q' — производная заряда по времени). Возникновение тока эквивалентно появлению у шарика скорости, когда мы его отпускаем. На рисунке 2.6 изображены последовательные фазы перезарядки конденсатора и рядом для сравнения фазы колебания шарика на пружине (положение равновесия шарика отмечено горизонтальной линией). Рисунок 2.6, а соответствует начальному моменту после перевода переключателя в положение 2.

Вследствие явления самоиндукции сила тока увеличивается постепенно (рис. 2.6, б). Точно также вследствие инертности шарика его скорость увеличивается постепенно.

По мере разрядки конденсатора энергия электрического поля уменьшается, но одновременно возрастает энергия магнитного поля тока

$$W_m = \frac{Li^2}{2}, \quad (2.2.2)$$

где L — индуктивность катушки. В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), энергия электрического по-

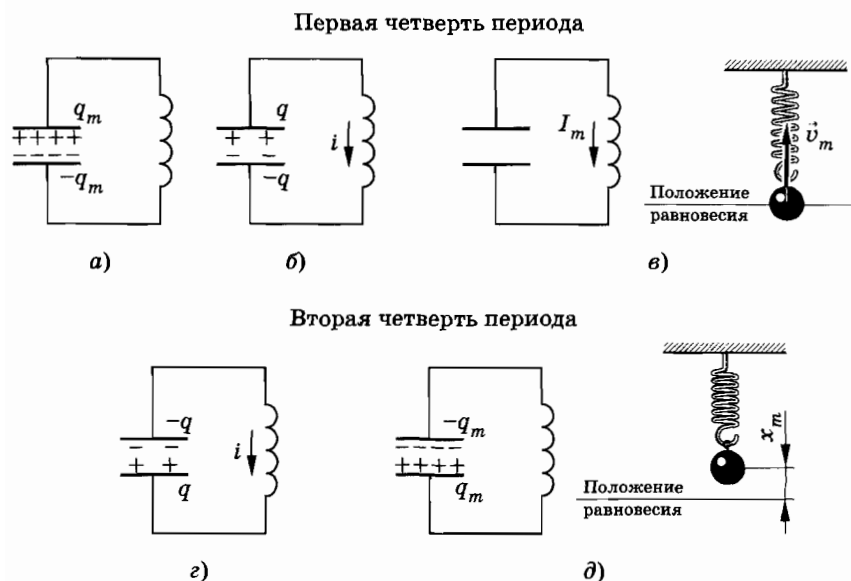


Рис. 2.6

ля станет равной нулю. Энергия же тока (энергия магнитного поля) будет максимальной. Следовательно, в этот момент сила тока также достигнет максимального значения I_m (рис. 2.6, в). Этому моменту соответствует прохождение шарика через положение равновесия с максимальной скоростью. В момент прохождения положения равновесия шарик не обладает потенциальной энергией, но зато его кинетическая энергия максимальна.

Несмотря на то, что к этому моменту разность потенциалов на концах катушки становится равной нулю, электрический ток не прекращается сразу. Этому препятствует самоиндукция. Как только сила тока и созданное током магнитное поле начнут уменьшаться, возникнет вихревое электрическое поле, которое направлено по току и поддерживает его, в результате конденсатор начнет перезаряжаться (рис. 2.6, г).

Конденсатор перезаряжается до тех пор, пока сила тока, постепенно уменьшаясь, не станет равной нулю. Энергия магнитного поля в этот момент также равна нулю, а энергия электрического поля конденсатора снова станет максимальной (рис. 2.6, д). При колебаниях шарика этому моменту соответствует остановка его в крайнем верхнем положении, когда максимальна потенциальная энергия.

Далее процесс протекает в обратном порядке и конденсатор опять перезаряжается. Если бы не было потерь энергии, то этот процесс продолжался бы сколь угодно долго: колебания были бы незатухающими. Через промежутки времени, равные периоду колебаний, состояния системы в точности повторялись бы.

Но в действительности потери энергии неизбежны. Катушка и соединительные провода обладают сопротивлением R , и это ведет к выделению теплоты. Аналогично действие сил трения ведет к убыли механической энергии шарика и затуханию его колебаний.

Итак, мы рассмотрели явления в колебательном контуре с качественной стороны и сравнили их с механическими колебаниями. Взаимное соответствие между механическими и электрическими величинами иллюстрируется таблицей 1.

Таблица 1

Механические величины	Электрические величины
Координата x	Заряд q
Скорость $v_x = x'$	Сила тока $i = q'$
Ускорение $a_x = v'_x$	Скорость изменения силы тока i'
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Величина, обратная емкости, $\frac{1}{C}$
Коэффициент трения μ	Сопротивление R
Потенциальная энергия $\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля $\frac{q^2}{2C}$
Кинетическая энергия $\frac{mv_x^2}{2}$	Энергия магнитного поля $\frac{Li^2}{2}$

Соответствие между m и L , k и $\frac{1}{C}$ видно из сопоставления выражений для энергии.

§ 2.3. ФОРМУЛА ТОМСОНА

Перейдем теперь к количественной теории процессов в колебательном контуре.

Формула Томсона

Наша задача в первую очередь будет заключаться в определении периода (или частоты) свободных электрических колебаний. Правда, основываясь на аналогии между свободными механическими и свободными электрическими колебаниями,