

Переходные процессы в электрических цепях постоянного тока в школьном курсе физики

В.И. Жидкевич

Учреждение образования «Витебский государственный университет им. П.М. Машерова»

В статье рассматриваются стационарный и переходный режимы работы цепи постоянного тока. Приведены краткие сведения о переходных процессах: причины их возникновения, основные определения и законы коммутации, на которых основаны исследования данных процессов. Причинами возникновения переходных процессов могут быть включение и выключение источников питания, изменение параметров элементов цепи, короткие замыкания на участках электрических цепей. Рассмотрены примеры расчета цепей постоянного тока, содержащих емкость или индуктивность. Показано, что в момент замыкания или размыкания цепи возможны резкие увеличения токов и напряжений.

Ключевые слова: источник тока, резистор, конденсатор, катушка, переходный процесс.

Transition processes in electric current chains of constant current in school course of Physics

V.I. Zhidkevich

Educational establishment «Vitebsk State University named after P.M. Masherov»

The article considers stationary and transitional modes of the operation of constant current chain. Brief data on transitional processes are presented: reasons for their emergence, basic definitions and commutation laws, on which studies of transitional processes are based. The reasons for the emergence of transitional processes can be plugging in and out sources of power, changing the parameters of the elements of chain, power outage at sections of electric current chain. Examples of calculation of constant electric current chains, which contain capacity or inductivity, are considered. It is shown that at the moment of closing or disruption of the chain great increases of currents and voltage are possible.

Key words: source of current, resistor, condensator, roll, transition process.

В школьном курсе физики рассматривается только стационарный, или установившийся, режим работы электрической цепи постоянного тока. В этом режиме напряжения и токи во всех участках электрической цепи остаются неизменными в течение сколь угодно большого промежутка времени. При переходе от одного установившегося режима к другому в электрических цепях возникают электромагнитные процессы, которые называются переходными, или неустановившимися, процессами.

Учащиеся, которые принимают участие в олимпиадах и готовятся к поступлению в ведущие вузы республики, должны иметь представление о переходных процессах в электрических цепях постоянного тока. Рассмотрим эти процессы подробнее.

В электрической цепи переходный процесс возникает при изменении режима ее работы: включении или отключении цепи, изменении параметров элементов R , L или C . Указанные действия, вызывающие переходные процессы в электрических цепях, получили название *коммутации* [1–2].

Переход от исходного режима работы цепи к последующему установившемуся процессу происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени и чаще всего составляет десятые и сотые доли секунды. Объясняется это тем, что каждому состоянию цепи, обладающей индуктивностью L и емкостью C , соответствуют определенные запасы энергии электрического поля $W_э = \frac{Cu_C^2}{2}$ и магнитного поля $W_м = \frac{Li_L^2}{2}$. Эти запасы энергии, связанные с элементами электрической цепи, неодинаковы при различных состояниях и режимах работы цепи [2]. Переход к новому режиму связан с нарастанием или убыванием энергии данных полей. Энергия, запасенная в магнитном поле индуктивности L , и энергия, запасенная в электрическом поле емкости C , не может изменяться мгновенно. Внезапное, скачкообразное изменение энергии равносильно тому, что мощность источника, равная производной энергии по времени, достигала бы бесконечных значений, что физически невозможно. В связи с этим скачкообразные изменения тока в катушке и напряжения на конденсаторе невозможны.

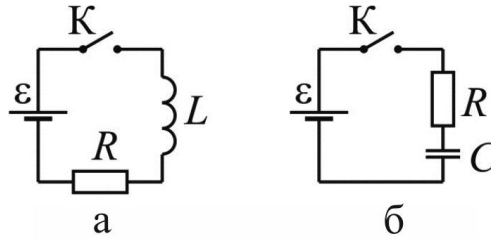


Рис. 1.

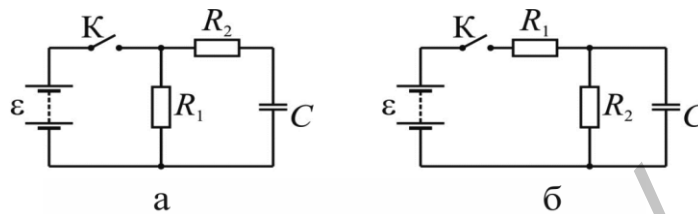


Рис. 2.

Принцип, согласно которому ток в цепи с индуктивностью не может изменяться скачком и в начальный момент переходного процесса сохраняет свое предшествующее значение, а затем плавно изменяется, называют *первым законом коммутации*. Аналогичный принцип, согласно которому напряжение на зажимах конденсатора не может изменяться скачком и в начальный момент переходного процесса сохраняет свое предшествующее значение, а затем плавно изменяется, называют *вторым законом коммутации*.

Математический анализ переходных процессов в электрических цепях базируется на том, что закон Ома и правила Кирхгофа применимы как к установившимся, так и к неустановившимся режимам работы цепи.

Рассмотрим включение катушки индуктивности на постоянное напряжение (рис. 1, а).

До замыкания ключа К ток в цепи, напряжения U_R и U_L на активном сопротивлении R и индуктивности L равны нулю. Из первого закона коммутации следует, что в начальный момент времени после замыкания ключа (при $t = 0$) ток в цепи равен нулю ($i_0 = 0$), падение напряжения на сопротивлении $i_0 R = 0$, а напряжение на катушке равно напряжению источника $U_{0L} = \varepsilon$ и цепь как бы разомкнута индуктивностью.

Рассмотрим включение цепи с активным сопротивлением R и емкостью C на постоянное напряжение (рис. 1, б).

До замыкания ключа К в установившемся режиме ток в цепи, напряжения на резисторе и конденсаторе равны нулю. Из второго закона коммутации следует, что в начальный момент переходного периода после замыкания цепи (при $t = 0$) напряжение на конденсаторе равно

нулю (конденсатор как бы замкнут накоротко). Напряжение на резисторе равно напряжению источника $i_0 R = \varepsilon$, а ток в цепи $i_0 = \varepsilon/R$.

Одним из вопросов, вызывающих затруднения у студентов физических специальностей и молодых преподавателей, является расчет переходных процессов в электрических цепях постоянного тока.

Целью настоящей статьи является оказание методической помощи студентам физических специальностей и начинающим преподавателям в изучении переходных процессов в электрических цепях постоянного тока.

Материал и методы. Для этого исследовали стационарный и переходный режимы работы электрических цепей постоянного тока, содержащих емкость или индуктивность. Основным методом исследования являлось решение задач.

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим примеры решения некоторых задач с учетом законов коммутации [3].

1. В электрической схеме (рис. 2, а), состоящей из источника тока с $\varepsilon = 12$ В, резисторов $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом и конденсатора C (большой емкости), замыкают ключ. Найти ток через батарею сразу после замыкания ключа, в тот момент, когда напряжение на конденсаторе равно $\varepsilon/3$ и в установившемся режиме. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

Решение. В момент замыкания ключа К, согласно второму закону коммутации, напряжение на конденсаторе равно нулю. Тогда разность потенциалов на резисторе R_2 равна ε . Ток через резистор R_2 равен: $I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2} = \frac{12}{20} = 0,6$ А,

а ток через батарею равен

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\varepsilon}{R_1} + \frac{\varepsilon}{R_2} = 1,8 \text{ А.}$$

После замыкания ключа К конденсатор начнет заряжаться, и напряжение на нем будет увеличиваться. Токи через резистор R_2 и в общей цепи в рассматриваемом переходном процессе будут изменяться. Согласно закону Ома, $\varepsilon = I_2 R_2 + U_C$.

Когда $U_C = \frac{\varepsilon}{3}$, ток I_2 равен

$$I_2 = \frac{\varepsilon - U_C}{R_2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{R_2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{12}{20} = 0,4 \text{ А.}$$

Ток в общей цепи

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\varepsilon}{R_1} + I_2 = 1,2 + 0,4 = 1,6 \text{ А.}$$

В установившемся режиме ток через конденсатор и резистор R_2 равен нулю, а ток через батарею равен $I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1} = \frac{12}{10} = 1,2 \text{ А.}$

Таким образом, ток через батарею в переходном режиме изменяется от 1,8 А до 1,2 А.

2. В электрической схеме (рис. 2, б), состоящей из батареи с $\varepsilon = 12 \text{ В}$, резисторов $R_1 = 50 \text{ Ом}$ и $R_2 = 100 \text{ Ом}$ и конденсатора C (большой емкости), замыкают ключ К. Найти напряжение на конденсаторе в установившемся режиме. Найти ток через батарею сразу после замыкания ключа, в тот момент, когда напряжение на конденсаторе достигло значения $\varepsilon/2$ и в установившемся режиме. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

Решение. В установившемся режиме ток через конденсатор равен нулю, а ток через батарею равен $I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2} = 0,08 \text{ А}$. Напряжение на конденсаторе равно напряжению на сопротивлении R_2 : $U_C = I_2 R_2 = \frac{\varepsilon R_2}{R_1 + R_2} = 8 \text{ В}$.

В момент замыкания ключа конденсатор не заряжен, напряжение на конденсаторе, согласно

первому закону коммутации, равно нулю. Следовательно, напряжение на резисторе R_2 также равно нулю. Ток через батарею равен $I = \frac{\varepsilon}{R_1} = 0,24 \text{ А}$. Конденсатор и резистор R_2 со-

единены параллельно. Поэтому в тот момент, когда напряжение на конденсаторе достигло значения $\varepsilon/2$, напряжение на сопротивлении R_1 будет равно $U_1 = \varepsilon - \frac{\varepsilon}{2} = \frac{\varepsilon}{2}$. Ток через батарею равен току через резистор R_1 :

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{\varepsilon}{2R_1} = 0,12 \text{ А.}$$

Таким образом, в момент замыкания цепи, содержащей конденсатор, ток через батарею значительно превышает установившийся ток.

3. В схеме, изображенной на рис. 3, а, в начальный момент ключи K_1 и K_2 разомкнуты, а конденсатор C (большой емкости) не заряжен. После замыкания ключа K_1 амперметр показывает ток $I_1 = 3 \text{ мкА}$. Затем замыкают ключ K_2 . Чему будет равно показание амперметра сразу после замыкания ключа K_2 , если известно, что $R_2 = 2R_1$? Внутренним сопротивлением батареи и амперметра пренебречь.

Решение. После замыкания ключа K_1 ток в цепи $I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2} = \frac{\varepsilon}{3R_1}$. Напряжение на резисторе R_2 будет равно $U_2 = I_1 R_2 = \frac{2}{3} \varepsilon$. В момент

замыкания ключа K_2 конденсатор C не заряжен, напряжение на нем, согласно первому закону коммутации, равно нулю. Значит, и напряжение на резисторе R_2 в этот момент станет равным нулю. Тогда ток в цепи будет равным

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_1} = \frac{I_1 (R_1 + R_2)}{R_1} = I_1 \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 9 \text{ мкА.}$$

Таким образом, включение конденсатора параллельно сопротивлению R_2 приводит к увеличению тока через батарею в начале переходного периода с 3 мкА до 9 мкА, т.е. в три раза.

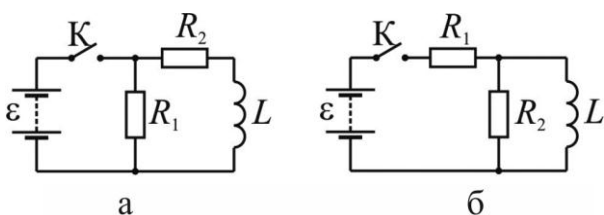


Рис. 3.

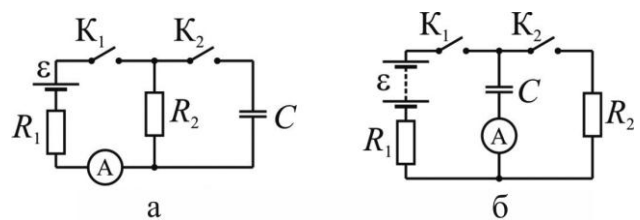


Рис. 4.

4. В схеме, изображенной на рис. 3, б, в начальный момент ключи K_1 и K_2 разомкнуты, а конденсатор C (большой емкости) не заряжен. Через некоторое время после замыкания ключа K_1 амперметр показывает ток $I_1 = 1$ мкА. В этот момент замыкают ключ K_2 . Чему будет равно показание амперметра сразу после замыкания ключа K_2 , если известно, что $R_2 = 2R_1 = 10^8$ Ом? ЭДС батареи $\varepsilon = 100$ В. Внутренним сопротивлением батареи и амперметра пренебречь.

Решение. После замыкания ключа K_1 конденсатор начнет заряжаться. По мере зарядки конденсатора ток будет уменьшаться, а напряжение на конденсаторе будет расти. К моменту замыкания ключа K_2 напряжение на конденсаторе будет равно

$$U_C = \varepsilon - I_1 R_1 = 100 - 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^6 = 50 \text{ В.}$$

После замыкания ключа K_2 конденсатор начнет разряжаться через сопротивление R_2 . Ток разрядки конденсатора будет равен $I_2 = \frac{U_C}{R_2} = \frac{50}{10^8} = 0,5$ мкА. Через конденсатор протекают ток зарядки I_1 и ток разрядки в противоположных направлениях. Амперметр покажет ток

$$I_C = I_1 - I_2 = 0,5 \text{ мкА.}$$

5. В электрической схеме (рис. 4, а), состоящей из батареи с $\varepsilon = 12$ В, резисторов $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом и катушки индуктивности L , замыкают ключ. Найти ток через батарею сразу после замыкания ключа и в установившемся режиме. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

Решение. До замыкания ключа ток в цепи, напряжения на активном сопротивлении R_2 и индуктивности U_L равны нулю. Из первого закона коммутации следует, что в начальный момент после замыкания цепи ток в сопротивлении R_2 равен нулю, падение напряжения на сопротивлении R_2 равно нулю, а напряжение на катушке равно напряжению источника $U_{0L} = \varepsilon$ и цепь как бы разомкнута индуктивностью.

Ток через батарею равен току, протекающему через резистор

$$R_1: I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1} = \frac{12}{10} = 1,2 \text{ А.}$$

В установившемся режиме ЭДС самоиндукции в катушке равна нулю, а так как сопротив-

ление катушки постоянному току равно нулю, то ток через сопротивление R_2 равен $I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2} = \frac{12}{20} = 0,6$ А. Ток через батарею равен сумме токов I_1 и I_2 .

$$I = I_1 + I_2 = \frac{\varepsilon}{R_1} + \frac{\varepsilon}{R_2} = 1,8 \text{ А.}$$

Таким образом, ток через батарею в переходном режиме изменяется от 1,2 А до 1,8 А.

6. В электрической схеме, состоящей из батареи с $\varepsilon = 12$ В, резисторов $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 100$ Ом и индуктивности L (рис. 4, б), замыкают ключ K . Найти ток через батарею сразу после замыкания ключа и в установившемся режиме. Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.

Решение. Катушка и резистор R_2 соединены параллельно.

До замыкания ключа ток в цепи, напряжения на активном сопротивлении R_2 и индуктивности U_L равны нулю. Из первого закона коммутации следует, что в начальный момент после замыкания цепи ток в катушке равен нулю и цепь как бы разомкнута индуктивностью.

Ток через батарею равен

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + R_2} = 0,08 \text{ А.}$$

В установившемся режиме активное сопротивление катушки равно нулю, катушка шунтирует сопротивление R_2 и ток через батарею равен

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_1} = \frac{12}{50} = 0,24 \text{ А.}$$

Ток через батарею в переходном режиме возрастает с 0,08 А до 0,24 А.

Заключение. Таким образом, предложенные решения задач окажут определенную методическую помощь преподавателям физики и студентам физических специальностей при расчете переходных процессов в электрических цепях постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прянишников, В.А. Теоретические основы электротехники / В.А. Прянишников. – СПб.: КОРОНАПринт, 2004. – 366 с.
2. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Высшая школа, 2000. – 542 с.
3. Чешев, Ю.В. Методическое пособие по физике для поступающих в вузы / Ю.В. Чешев. – М.: Физматлит, 2008. – 336 с.

Поступила в редакцию 05.06.2012. Принята в печать 24.08.2012
 Адрес для корреспонденции: e-mail: Zhidkevich@ tut.by – Жидкевич В.И.