

## РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХКОНТУРНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СХЕМАХ

В. С. МЕЛИХОВ, И. П. ЧУЧАЛИН

Для создания импульсных магнитных полей часто используется разряд предварительно заряженной батареи конденсаторов. Разрядный контур обычно состоит из емкости, индуктивности и управляемого коммутирующего прибора (тиратрон, игнитрон и т. п.).

Заряд конденсаторов осуществляется от источника постоянного тока, чаще всего от многофазного выпрямителя. В целях экономии потребляемой мощности в качестве ограничительного элемента в зарядную цепь включают не активное сопротивление, а достаточно большую индуктивность (дрессель). Эквивалентная схема рассматриваемых цепей приведена на рис. 1.

Здесь:  $U_B$  — среднее значение напряжения выпрямителя.

$L_1$  и  $r_1$  — индуктивность и активное сопротивление зарядного контура,  $C$  — емкость батареи конденсаторов,  $L_2$  и  $r_2$  — индуктив-

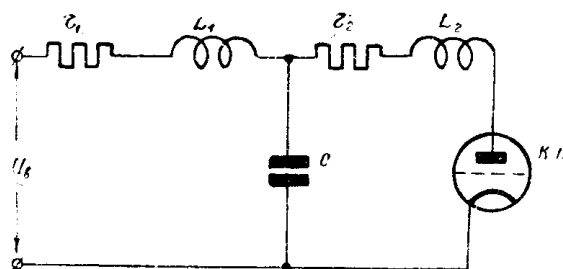


Рис. 1.

ность и активное сопротивление разрядного контура,  $К. П.$  — коммутирующий прибор.

Рассмотрим переходные процессы, происходящие в этой схеме при периодическом заряде и разряде емкости  $C$ .

В начальный момент времени выпрямитель отключен, напряжение на конденсаторах равно нулю. При включении цепи, обладающей индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением на постоянное напряжение в случае, если заряд конденсаторов будет иметь колебательный характер, ток в зарядном контуре и напряжение на конденсаторах изменяются по известным законам:

$$i_{зар.} = \frac{U_0 e^{-\delta_1 t}}{\omega_1^1 L_1} \cdot \sin \omega_1^1 t, \quad (1)$$

$$U_c = U_0 - U_0 \frac{\omega_1}{\omega_1^1} e^{-\delta_1 t} \cdot \cos(\omega_1^1 t - \xi_1), \quad (2)$$

где  $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}$  — угловая частота незатухающих колебаний зарядного контура;

$\omega_1^1 = \sqrt{\omega_1^2 - \delta_1^2}$  — угловая частота затухающих колебаний зарядного контура;

$$\delta_1 = \frac{r_1}{2L_1};$$

$\xi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\delta_1}{\omega_1^1}$  — лежит в пределах  $0 \leq \xi_1 \leq \frac{\pi}{2}$ .

Так как в зарядном контуре источником постоянного напряжения является выпрямитель, процесс заряда конденсатора прекратится по прошествии времени, равного полупериоду собственных затухающих колебаний зарядного контура. Напряжение на конденсаторах к этому моменту времени будет

$$U_1 = U_0 \left( 1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_1}} \right), \quad (3)$$

где  $Q_1 = \frac{\omega_1 L_1}{r_1}$  — добротность зарядного контура.

После того, как конденсаторы зарядятся, включается коммутирующий прибор *К. П.* и конденсаторы начинают разряжаться через цепь  $L_2 r_2$ . Как только напряжение на них в процессе разряда станет меньше напряжения выпрямителя, от последнего потечет ток подзаряда. Таким образом, одновременно будет происходить разряд и заряд конденсаторов. Для точного анализа переходных процессов, происходящих в схеме (рис. 1) в этот интервал времени, необходимо составить систему уравнений, решение которой приведет к линейному дифференциальному уравнению 3-го порядка. В общем виде решение дифференциального уравнения 3-го порядка является сложным.

В импульсном режиме работы, когда промежуток времени между импульсами во много раз больше длительности импульса, период собственных колебаний зарядного контура целесообразно выбрать много больше периода собственных колебаний разрядного контура.

Это позволит снизить амплитуду зарядного тока и применить менее мощные вентили в выпрямителе. При резком различии частот зарядного и разрядного контуров влияние зарядного контура на разрядный до такой степени ослабевает, что разряд конденсатора можно приближенно рассматривать без учета влияния зарядного контура. Последнее обстоятельство значительно упрощает анализ переходных процессов.

Если для разрядного контура выполняется условие

$$\delta_2 < \omega_2,$$

где  $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C}}$  — круговая частота собственных незатухающих колебаний разрядного контура;

$$\delta_2 = \frac{r_2}{2L_2},$$

то разряд конденсатора будет иметь колебательный характер. Ток в разрядном контуре и напряжение на конденсаторах будут описываться уравнениями:

$$i_{\text{разр}} = \frac{U_0}{\omega_2^1 L_2} e^{-\delta_2 t} \sin \omega_2^1 t, \quad (4)$$

$$U_c = U_0 e^{-\delta_2 t} \cos(\omega_2^1 t - \xi_2), \quad (5)$$

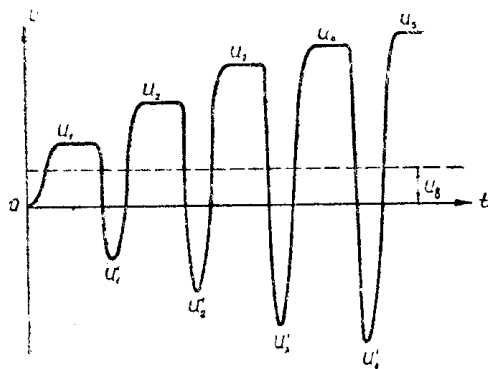


Рис. 2.

где  $U_0$  — напряжение на емкости к моменту ее разряда;

$\omega_2^1 = \sqrt{\omega_2^2 - \delta_2^2}$  — круговая частота собственных затухающих колебаний разрядного контура;

$\xi_2 = \text{arctg} \frac{\delta_2}{\omega_2^1}$  — и лежит в преде-

лах  $0 < \xi_2 \leq \frac{\pi}{2}$ .

В момент перехода тока через нулевое значение коммутирующий прибор гаснет и процесс прекращается. Полагая  $t = \frac{T_2^1}{2}$ , получим величину напряжения на конденсаторах в этот момент времени (рис. 2).

$$U_1^1 = U_0 e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}, \quad (6)$$

где  $Q_2 = \frac{\omega_2 L_2}{r_2}$  — добротность разрядного контура.

Подставляя в формулу (6) вместо  $U_0$  значение напряжения из формулы (3), получим следующее выражение для величины напряжения на конденсаторах после первого разряда

$$U_1^1 = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_1}} \right) e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}. \quad (7)$$

По окончании разряда конденсаторы вновь заряжаются от выпрямителя. Напряжение, до которого они зарядятся во второй раз, можно определить из следующего выражения

$$U_2 = U_0 + (U_0 - U_1^1) e^{-\frac{\pi}{2Q_1}}.$$

Подставляя вместо  $U_1$  его значение из (7), получим

$$U_2 = U_b \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_1}}\right) \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}\right), \quad (8)$$

где 
$$Q_2 = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{Q_1 + Q_2}.$$

Рассуждая аналогично, получим выражение для напряжения на конденсаторах после  $n$ -го разряда

$$U_n = \frac{U_b \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_1}}\right) \left(1 - e^{-\frac{n\pi}{2Q_2}}\right)}{1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}}. \quad (9)$$

В установившемся режиме конденсаторы заряжаются до напряжения

$$U_{уст.} = U_b \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_1}}}{1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}}. \quad (10)$$

Из формулы (10) видно, что чем больше добротность контуров, тем выше величина установившегося напряжения на конденсаторах. В более сильной степени величина установившегося напряжения зависит от добротности зарядного контура, чем разрядного. Зарядный ток в установившемся режиме определяется выражением

$$i_{зар.} = \frac{U_b \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}\right) e^{-\omega_1 t}}{\omega_1 L_1 \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}\right)} \cdot \sin \omega_1 t. \quad (11)$$

Мощность, отбираемая от выпрямителя, может быть найдена по формуле

$$P_b = U_b i_{cp} = U_b \cdot \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T_1}{2}} i_{зар.} dt,$$

где  $T$  — период повторения импульсов тока в разрядном контуре.

Подставляя значение  $i_{зар.}$  из (11) и интегрируя, получаем следующее выражение для мощности, потребляемой схемой,

$$P_b = \frac{CU_b^2 \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_1}}\right) \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}\right)}{1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}}.$$

$$\frac{CU_{уст.}^2}{T} \frac{\left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_2}}\right)\left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_3}}\right)}{1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_1}}} \quad (12)$$

На рис. 3 приведена осциллограмма роста напряжения на конденсаторах для частного случая ( $Q_1 = 6,5$  и  $Q_2 = 11,3$ ).

При значениях добротностей  $Q_1 = 6,5$  и  $Q_2 = 11,3$  величина установившегося напряжения, подсчитанная по формуле (10), равна

$$U_{уст.} = 5,63 U_в.$$

Как видно, для заряда конденсаторов до заданного значения напряжения в этом случае требуется выпрямительная установка со

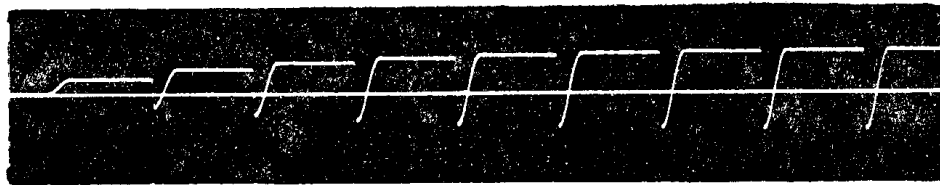


Рис. 3

средним значением выпрямленного напряжения, почти в шесть раз меньшим. Это обстоятельство является определенным преимуществом данной схемы, позволяя заряжать конденсаторы до высоких напряжений от низковольтных выпрямителей.

Однако от выпрямительной установки отбирается довольно большой ток. В импульсном режиме работы в случае сравнительно большой скважности выбор вентиля определяется в основном максимальным значением зарядного тока. Для уменьшения его величины приходится увеличивать индуктивность дросселя в цепи заряда, а это может привести к тому, что размеры дросселя окажутся неразумно большими. Нетрудно так же заметить, что в момент погасания коммутирующего прибора к его аноду почти мгновенно прикладывается большое отрицательное напряжение, что при малой скорости деионизации может привести к возникновению обратного зажигания.

Некоторым недостатком рассмотренной схемы является также резкая зависимость напряжения на конденсаторах в установившемся режиме от добротности зарядного и разрядного контуров, что приводит к повышенной неустойчивости работы.

Указанные недостатки устраняются при перезаряде конденсаторов через дополнительный вентиль, включенный встречно-параллельно основному коммутирующему прибору.

Рассмотрим работу схемы с перезарядом конденсаторов. В практических случаях добротность разрядного контура бывает выше добротности зарядного контура. При малом затухании в разрядном контуре, т. е. при  $\delta_2 \ll \omega_2^1$ , напряжение на конденсаторах во время разряда будет изменяться по закону

$$U_c = U_0 e^{-\delta_2 t} \cdot \cos \omega_2^1 t. \quad (13)$$

Найдем выражение для зарядного тока во время разряда и перезаряда конденсаторов.

В этом случае

$$U_{\delta} = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + U_c.$$

Решая вышеприведенное уравнение с учетом начальных условий (при  $t = 0$   $i_1 = 0$ ) и принимая  $\omega_2^2 \gg (2\delta_1 - \delta_2)$ , выражение для тока получим в виде

$$i_1^I = \left[ \frac{U_{\delta}}{r_1} (e^{2\delta_1 t} - 1) - \frac{U_0}{L_1 \omega_2^2} \cdot e^{(2\delta_1 - \delta_2)t} \cdot \sin \omega_2^1 t \right] e^{-2\delta_1 t}. \quad (14)$$

Значение зарядного тока в момент окончания разряда и перезаряда конденсаторов

$$I_1^I = \frac{U_{\delta}}{r_1} (1 - e^{-2\delta_1 T_2}). \quad (15)$$

Мы рассмотрели процесс заряда конденсаторов при одновременном их разряде. Нашли для этого отрезка времени закон изменения зарядного тока. После окончания работы коммутирующих приборов разряд конденсаторов прекратится и зарядный ток будет изменяться по другому закону, отличному от (14).

В этом случае, как и раньше, имеем:

$$U_{\delta} = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{c} \int i_1 dt.$$

Решением данного уравнения с учетом начальных условий (при  $t = 0$   $i_1 = I_1^I$ ,  $U_c = U_0 e^{-\frac{\pi}{Q_2}}$ ) будет:

$$i_1^{II} = \left[ \frac{1}{\omega_1^1} \left( \frac{U_{\delta} - U_0 e^{-\frac{\pi}{Q_2}}}{L_1} - \delta_1 I_1^I \right) \cdot \sin \omega_1^1 t + I_1^I \cos \omega_1^1 t \right] \cdot e^{-\delta_1 t} \quad (16)$$

Приближенно (практически с точностью до 5%) предыдущую формулу можно записать

$$i_1^{II} \cong I_1^I e^{-\delta_1 t} \cdot \cos \omega_1^1 t. \quad (17)$$

Подставив в (17) вместо  $I_1^I$  его значение (15), окончательно зарядный ток после прекращения работы коммутирующих приборов запишется:

$$i_1^{II} \cong \frac{U_{\delta}}{r_1} (1 - e^{-2\delta_1 T_2}) \cdot e^{-\delta_1 t} \cdot \cos \omega_1^1 t. \quad (18)$$

Для подзаряда батареи конденсаторов требуется выпрямительная установка, способная дать меньший по величине ток по сравнению с током, необходимым для заряда конденсаторов, когда они не перезаряжаются. Среднее значение напряжения выпрямителя в случае с перезарядом батареи конденсаторов должно быть выше, чем в случае без перезаряда.

При установившемся режиме работы схемы с перезарядом конденсаторов последние каждый раз заряжаются до максимального значения напряжения выпрямителя.

Нетрудно видеть, что максимальный ток от выпрямителя при работе схемы с перезарядом конденсаторов будет во время включения выпрямителя, в первый момент зарядки конденсаторов, когда напряжение на них равно нулю. Для ограничения первоначальной волны тока от выпрямителя в зарядной цепи можно предусмотреть ограничивающее активное сопротивление, которое после заряда конденсаторов шунтируется.

На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения  $U_c$  на батарее конденсаторов, разрядного тока  $i_{разр.}$  и зарядного тока  $i_{зар.}$  снятые

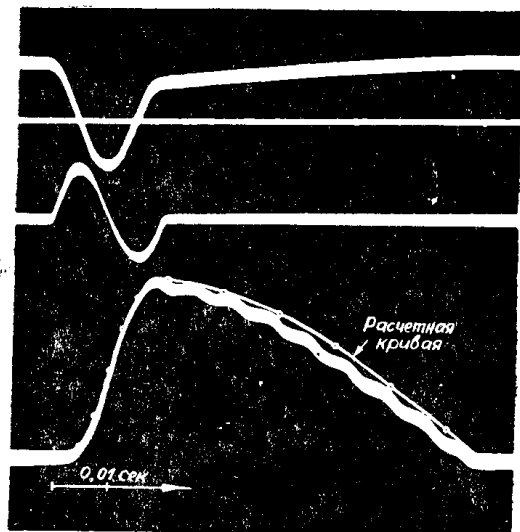


Рис. 4.

при работе схемы с перезарядом конденсаторов и при численном значении параметров:  $r_1 = 3,7 \text{ ома}$ ,  $L_1 = 0,87 \text{ гн}$ ,  $C = 1417 \text{ мкф}$ ,  $r_2 = 0,19 \text{ ома}$ ,  $L_2 = 6,8 \text{ мгн}$ ,  $U_a = 234 \text{ в}$ .

На том же рис. 4 нанесен график зависимости зарядного тока  $i_{зар.}$  от времени, подсчитанный по формулам (14) и (18). Как видно, совпадение экспериментальной кривой  $i_{зар.}$  с расчетной достаточно хорошее. Это доказывает то, что при расчетах схемы с перезарядом батарей конденсаторов можно пользоваться приведенными здесь приближенными формулами.

Мы рассмотрели работу импульсной схемы в двух случаях: без перезаряда и с перезарядом конденсаторов.

При рассмотрении предполагали резкое различие частот зарядного и разрядного контуров, что практически и бывает при импульсном режиме работы. Выпрямитель в обоих случаях считался неуправляемым, т. е. он не отключался в период разряда и перезаряда конденсаторов.

Рассматривая работу импульсной схемы „без перезаряда“, мы подразумевали отсутствие перезаряда конденсаторов через разрядный контур. В действительности же конденсаторы перезаряжались и в первом случае. Только перезаряд их происходил в зарядном контуре через вентили выпрямителя. Во втором случае, когда в разрядном контуре встречно-параллельно с основным коммутирующим прибором включен дополнительный, перезаряд конденсаторов мог осуществляться одновременно через две цепи: зарядную и разрядную. Но так как индуктивное и активное сопротивления зарядного контура больше аналогичных сопротивлений разрядного контура, практически во втором случае конденсаторы перезаряжались только через разрядный контур.