

Энергетические характеристики при изменении начальных условий колебательного заряда конденсатора от источника постоянного тока

Проведен анализ зависимости энергетических характеристик колебательного заряда конденсатора от источника постоянного напряжения от изменяемых начальных напряжений на конденсаторе и добротности контура. Определены энергетически наиболее целесообразные режимы заряда конденсатора. Показано, что увеличение как начального напряжения на конденсаторе, так и добротности контура приводит к увеличению КПД заряда. Также показано, что увеличение абсолютной величины отрицательного начального напряжения наряду с увеличением добротности контура приводит к повышению напряжения заряда конденсатора. Определены режимы заряда, при которых энергия потерь уменьшается в 3,2 и более раз, в то время как доза энергии, поступающая в конденсатор, уменьшается всего в 1,26 раза, а напряжение заряда конденсатора повышается в 1,3 и более раз. Определены также режимы получения высоких КПД заряда при стабилизации средней мощности, потребляемой от источника постоянного напряжения.

Проведено аналіз залежності енергетичних характеристик коливального заряду конденсатора від джерела постійної напруги від змінюваних початкових напруг на конденсаторі й добротності контуру. Визначено енергетично найбільш доцільні режими заряду конденсатора. Показано, що збільшення як початкової напруги на конденсаторі, так і добротності контуру призводить до збільшення ККД заряду. Також показано, що збільшення абсолютної величини негативної початкової напруги поряд зі збільшенням добротності контуру призводить до підвищення напруги заряду конденсатора. Визначено режими заряду, при яких енергія втрат зменшується в 3,2 і більше разів, у той час як доза енергії, що надходить у конденсатор, зменшується всього в 1,26 рази, а напруга заряду конденсатора підвищується в 1,3 і більше разів. Визначено також режими одержання високих ККД заряду при стабілізації середньої потужності, що споживається від джерела постійної напруги.

В импульсной электротехнике для реализации в технологической нагрузке кратковременной мощности, гораздо большей мощности сети, часто используются конденсаторные батареи как емкостные накопители электроэнергии [1,2,4,5]. В тиристорных системах электропитания технологических установок искроэрозионного диспергирования металлов используется колебательный заряд накопительного конденсатора от источника постоянного напряжения (ИПН) и его колебательный разряд на искроэрозионную нагрузку [1,7,8]. Схема формирователя разрядных импульсов такой системы электропитания показана на рис. 1.

В приведенной схеме колебательный заряд конденсатора емкостью C осуществляется от ИПН напряжением E через дроссель индуктивностью L и резистор сопротивлением R (обычно это суммар-

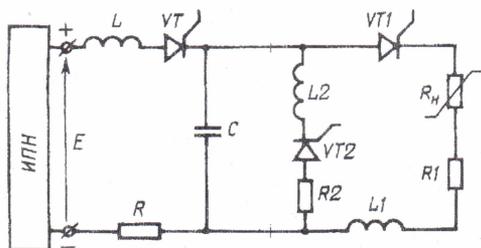


Рис. 1

ное активное сопротивление ИПН, дросселя, проводов контура и конденсатора) после отпирания зарядного тиристора VT . Колебательный разряд конденсатора осуществляется через сопротивление электроискровой нагрузки R_H , сопротивления R_1 (сопротивление разрядного контура) и индуктивность L_1 (индуктивность разрядного контура, которая обычно составляет 1—5 мкГн) после включения разрядного тиристора $VT1$. Использование колебательного заряда и разряда конденсатора позволяет осуществить быстрое естественное запирающее тиристорных ключей VT и $VT1$ и реализовать в нагрузке частоту разрядных импульсов тока более 1 кГц.

При колебательном разряде конденсатора на нагрузку происходит его перезаряд до напряжения $U_C(t=\tau_{\text{имп}}) < 0$ [3], где $\tau_{\text{имп}}$ — длительность разрядного импульса, которая при разрядах на электроискровую нагрузку обычно составляет 20—120 мкс. В работах [1,7] показано, что электрическое сопротивление электроискровой нагрузки обычно уменьшается при увеличении напряжения заряда конденсатора. Однако при возникновении случайным образом так называемых холостых разрядов (то есть длительных разрядов с малым током без электроискрений в нагрузке) электрическое сопротивление нагрузки скачкообразно увеличивается в несколько раз. Это сопротивление можно умень-

шить, повысив напряжение заряда конденсатора в следующем цикле [1,7]. Такие зависимости сопротивления электроискровой нагрузки от напряжения заряда конденсатора используются для реализации параметрической стабилизации выходных характеристик тиристорных систем электропитания искроэрозионных установок [1,7,8].

Если в схеме на рис. 1 имеет место только колебательный заряд и разряд конденсатора посредством поочередного включения тиристоров VT и $VT1$, то во всех зарядных циклах, начиная со второго, колебательный заряд будет осуществляться при начальном отрицательном напряжении на конденсаторе (по отношению к напряжению на выходе ИПН).

Если после завершения колебательного разряда конденсатора включить тиристор $VT2$, то конденсатор дополнительно перезарядится через дроссель индуктивностью L_2 и сопротивление R_2 , после чего колебательный заряд будет осуществляться при начальном положительном напряжении на конденсаторе (по отношению к напряжению на выходе ИПН).

В известных работах [1,7,8] основное внимание уделялось анализу токов и напряжений в разрядном и перезарядном контурах. При этом не учитывалась зависимость энергетических характеристик зарядного контура конденсатора (в первую очередь коэффициента полезного действия и дозы энергии, поступающей в конденсатор) от изменения величины начального напряжения на конденсаторе.

При анализе переходных процессов заряда конденсатора емкостью C от источника постоянного напряжения E через активное сопротивление R и индуктивность L (рис. 2) в известных учебниках по теоретическим основам электротехники указывается, что коэффициент полезного действия (КПД) процесса заряда $\eta = 0,5$ при любых значениях линейных элементов цепи R, L, C [3,6]. Под КПД подразумевается отношение электрической энергии W_C , поступающей в емкость, к энергии $W_{ист}$, отбираемой от ИПН, где

$$W_{ист} = \int_0^{\infty} E i dt = E \int_0^{\infty} C du_C = CE^2, \quad (1)$$

$$W_C = C \int_0^E u_C du_C = \frac{CE^2}{2} = \int_0^{\infty} Ri^2 dt = W_R, \quad (2)$$

W_R — энергия, рассеиваемая в резисторе R .

Уравнения (1) и (2) записаны для случая заряда при нулевых начальных условиях по напряжению и току $u_C(t=0) = U_{0C} = 0$, $i(t=0) = 0$, и при конечных условиях $u_C(t=\infty) = E$, $i(t=\infty) = 0$. В то же время, как было отмечено ранее, использование ненулевых начальных напряжений на конденсаторе позволяет осуществлять параметрическую стабилизацию режимов разряда конденсатора на техно-

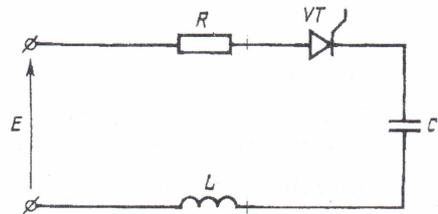


Рис. 2

логическую нагрузку, сопротивление которой может изменяться случайным образом [1,7,8]. Применение такого подхода может быть расширено для повышения эффективности регулирования энергетических характеристик во многих устройствах импульсной электротехники.

Поэтому целью работы является анализ энергетических характеристик при изменении начальных условий колебательного заряда конденсатора от ИПН.

Параметры зарядной цепи конденсатора (рис. 2) выберем таким образом, чтобы выполнялось условие колебательного его заряда: $Q = \frac{1}{R} \left(\frac{L}{C} \right)^{0,5} > 0,5$,

где Q — добротность зарядного контура.

Потерями электроэнергии в тиристорном ключе VT будем пренебрегать.

Для переходных процессов рассматриваемой электрической цепи справедливо уравнение [3,6]

$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = E. \quad (3)$$

При $u_C(t=0) = U_{0C}$ решением такого неоднородного уравнения будет выражение

$$u_C(t) = E + \frac{(E - U_{0C})}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}). \quad (4)$$

Тогда

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{C(E - U_{0C})}{p_1 - p_2} p_1 p_2 (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \quad (5)$$

где

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j \left(\omega_0^2 - \alpha^2 \right)^{0,5} = -\alpha \pm j\omega, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \left(\frac{1}{LC} \right)^{0,5}, \quad \omega = \left(\omega_0^2 - \alpha^2 \right)^{0,5}.$$

Учитывая, что

$$\frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} = \sin \omega t; \quad \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} = \cos \omega t,$$

получим

$$u_C(t) = E - (E - U_{0C}) e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \cdot \left(\frac{\sin(\omega_0 t)}{2QA} + \cos(\omega_0 t) \right), \quad (7)$$

$$i(t) = \frac{(E - U_{0C})}{L\omega_0 A} e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \cdot \sin(\omega_0 t), \quad (8)$$

где $A = [1 - 1/(4Q^2)]^{0,5}$. При $Q \geq 2$ можно считать, что $A \approx 1$, тогда

$$u_C(t) = E - (E - U_{0C}) e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \cdot \left(\frac{1}{2Q} \sin(\omega_0 t) + \cos(\omega_0 t) \right), \quad (9)$$

$$i(t) = \frac{(E - U_{0C})}{L\omega_0} e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \cdot \sin(\omega_0 t). \quad (10)$$

Наличие в схеме тиристорного ключа ИТ прерывает заряд конденсатора в момент времени $t_{U_{\max}}$, когда ток $i(t_{U_{\max}}) = 0$, напряжение на конденсаторе

$$U_C(t) \approx U_{C_{\max}} \quad (\text{и, следовательно } \frac{du_C(t_{U_{\max}})}{dt} = 0).$$

$$\frac{du_C(t_{U_{\max}})}{dt} = (E - U_{0C}) \omega_0 e^{-\frac{\omega_0 t_{U_{\max}}}{2Q}} \sin \omega_0 t_{U_{\max}} = 0. \quad (11)$$

Из (11) получаем $t_{U_{\max}} = \pi / \omega_0$. Тогда

$$\begin{aligned} U_{C_{\max}} &= E - (E - U_{0C}) e^{-\frac{\pi}{2Q}} \cdot \left(\frac{1}{2Q} \sin \pi + \cos \pi \right) = \\ &= E + (E - U_{0C}) e^{-\frac{\pi}{2Q}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициент повышения напряжения γ на конденсаторе при $U_{0C} \neq 0$ равен

$$\gamma = \frac{U_{C_{\max}}}{E} = 1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}} \left(1 - \frac{U_{0C}}{E} \right). \quad (13)$$

На рис. 3 показаны зависимости $U_{C_{\max}}^* = U_{C_{\max}} / E$ от U_{0C} / E при $Q_1 = 2$; $Q_2 = 5$; $Q_3 = 30$.

Анализ этих зависимостей показывает, что при изменении U_{0C} от $+E$ до $-E$ величина $U_{C_{\max}}$ изменяется от E до значений $> 2E$. Чем выше значение Q , тем больше значение $U_{C_{\max}}$: так при $Q_2 = 5$ $U_{C_{\max}} = 2,46E$, а при $Q_3 = 30$ $U_{C_{\max}} = 2,89E$.

Подставив $t = \pi / 2\omega_0$ в (10), получим

$$I_{\max} = \frac{(E - U_{0C})}{\rho} e^{-\pi/4Q},$$

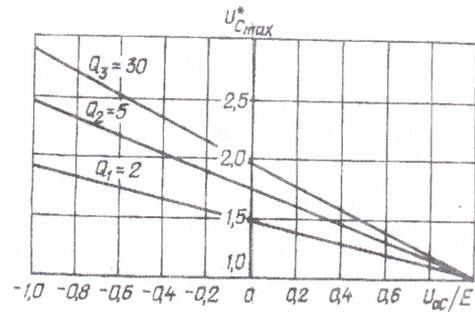


Рис. 3

где $\rho = (L/C)^{0,5}$ — волновое сопротивление цепи.

Доза энергии $W_{\text{ист}}$, отбираемая от ИПН за время заряда конденсатора

$$W_{\text{ист}} = E \frac{(E - U_{0C})}{\rho} \int_0^{\frac{\pi}{\omega_0}} e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q}} \cdot \sin \omega_0 t dt. \quad (14)$$

Дважды проинтегрировав (14) по частям, и учитывая, что $\rho \cdot \omega_0 = C^{-1}$, получим

$$W_{\text{ист}} = C \cdot E (E - U_{0C}) \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}} \right). \quad (15)$$

В работе [8] приведено следующее выражение для $W_{\text{ист}}$:

$$W_{\text{ист}} \approx 2C \cdot E (E - U_{0C}). \quad (16)$$

Действительно, такое выражение получается из (15) при допущении, что $e^{-\frac{\pi}{2Q}} \approx 1$, которое справедливо только при $Q > 20$, то есть только для высокооборотных зарядных цепей.

Доза энергии W_C , поступающая в конденсатор, рассчитывается по формуле

$$W_C = \frac{C}{2} (U_{C_{\max}}^2 - U_{0C}^2). \quad (17)$$

Подставляя в (17) выражение (12), получим

$$W_C = \frac{CE^2}{2} \left\{ \left[1 + \left(1 - \frac{U_{0C}}{E} \right) e^{-\frac{\pi}{2Q}} \right]^2 - \frac{U_{0C}^2}{E^2} \right\}. \quad (18)$$

Тогда с учетом выражений (15) и (18) получим

$$\eta = \frac{W_C}{W_{\text{ист}}} = \frac{\left[1 + \left(1 - \frac{U_{0C}}{E} \right) e^{-\frac{\pi}{2Q}} \right]^2 - \frac{U_{0C}^2}{E^2}}{2 \cdot \left(1 - \frac{U_{0C}}{E} \right) \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}} \right)}. \quad (19)$$

На рис. 4 показаны зависимости от U_{0C}/E :

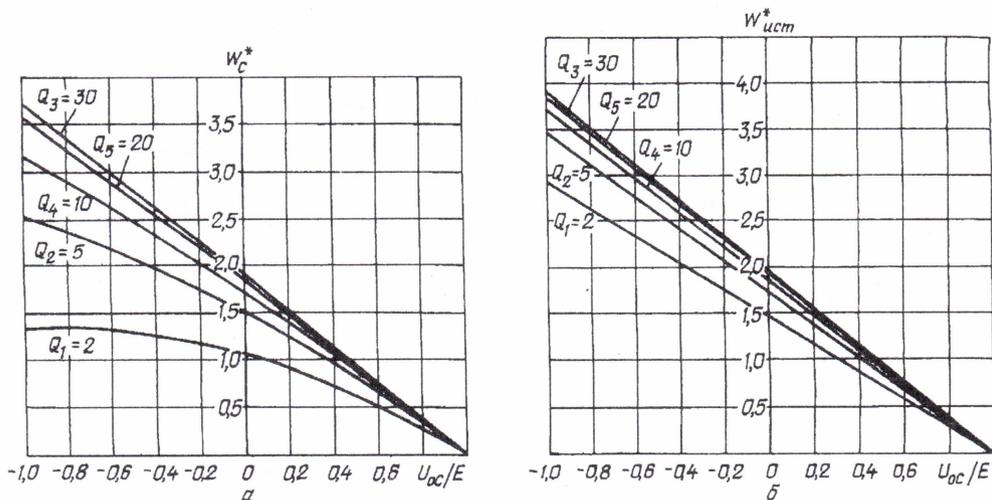


Рис. 4, а, б

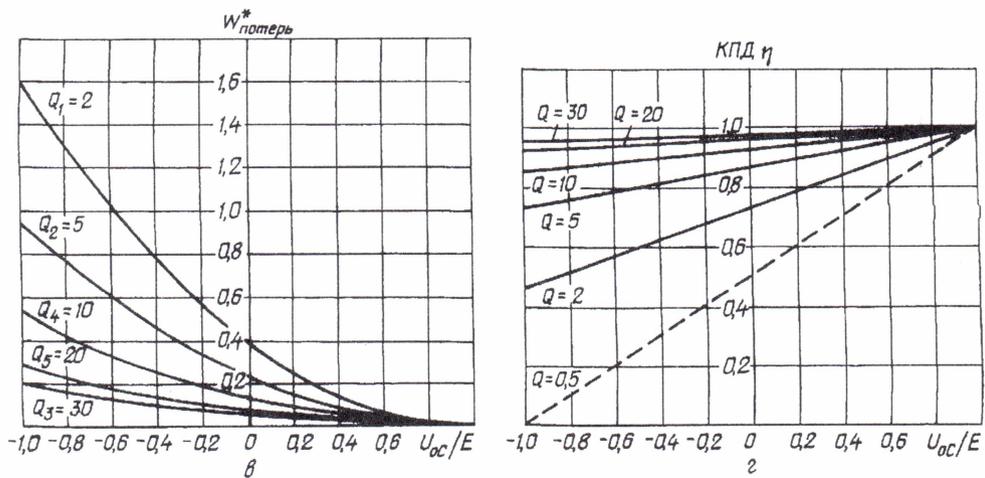


Рис. 4, в, г

- а) дозы энергии $W_C^* = W_C / CE^2$,
 б) дозы энергии $W_{ист}^* = W_{ист} / CE^2$,
 в) энергии потерь $W_{потерь}^* = W_{ист}^* - W_C^*$,
 г) КПД $\eta = W_C^* / W_{ист}^*$

при $Q_1=2$; $Q_2=5$; $Q_4=10$; $Q_5=20$; $Q_3=30$ во временном интервале $[0, \pi/\omega_0]$.

Пунктирной линией на рис. 4, г показана зависимость η от U_{OC} при $Q=0,5$.

Анализ зависимостей на рис. 4 показывает, что при изменении U_{OC} от $-E$ до $+E$, величины W_C^* , $W_{ист}^*$, $W_{потерь}^*$ уменьшаются, а КПД процесса заряда η возрастает.

При $U_{OC}/E > 0$ увеличение величины U_{OC} вызывает увеличение η (рис. 4, г) и уменьшение W_C^* (рис. 4, а). При $U_{OC}/E < 0$ увеличение $|U_{OC}|$ вызывает увеличение W_C^* (рис. 4, а), но значение η уменьшается (рис. 4, г).

На рис. 5, а, б показаны зависимости W_C^* , $W_{ист}^*$, $W_{потерь}^*$ и η от U_{OC}/E при $Q_1=2$ и $Q_5=20$.

Проанализируем изменение этих величин в зависимости от изменения U_{OC} при $Q_1=2$ и при $Q_5=20$. Рассмотрим:

- точку А, где $U_{OC} = -0,8E$;
- точку Б, где $U_{OC} = 0E$;
- точку В, где $U_{OC} = +0,8E$.

Полученные результаты представим в таблице.

	$Q_1=2$			$Q_5=20$		
	А	Б	В	А	Б	В
U_{OC}/E	-0,8	0	+0,8	-0,8	0	+0,8
W_C^*	1,34	1,06	0,28	3,23	1,85	0,382
$W_{потерь}^*$	1,28	0,4	0,02	0,24	0,07	0,003
$W_{ист}^*$	2,62	1,46	0,3	3,47	1,92	0,385
η	0,51	0,73	0,95	0,93	0,96	0,99

Из таблицы видно, что при $Q_1=2$ η в точке Б ($U_{OC}=0$) в 1,43 раза больше, а в точке В (когда $U_{OC} > 0$) — в 1,87 раз больше, чем в точке А (когда $U_{OC} < 0$). Другими словами в точке А W_C^* составляет 51%, в точке Б — 73%, а в точке В — 93% от $W_{ист}^*$.

Отметим, что при изменении U_{OC} от $U_{OC} < 0$ (точка А) до 0 (точка Б) величина W_C^* за один цикл

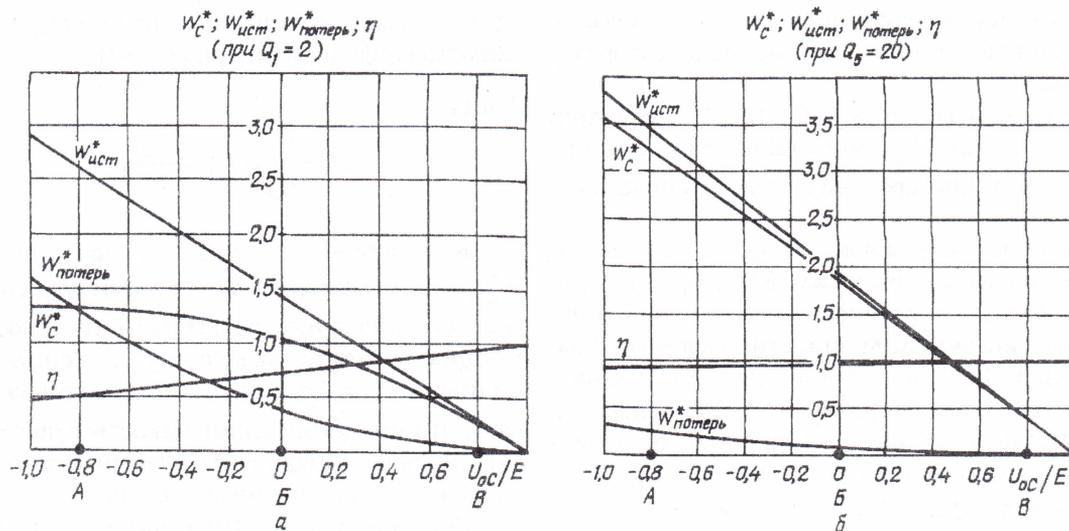


Рис. 5

заряда конденсатора уменьшается в 1,26 раза, а при изменении U_{OC} от 0 до $U_{OC} > 0$ (точка **В**) — еще в 3,79 раза. В целом при изменении U_{OC} от $U_{OC} < 0$ (точка **А**) до $U_{OC} > 0$ (точка **В**) W_C^* за один цикл заряда конденсатора уменьшается в 4,79 раза. Однако если W_C^* уменьшается в 1,26 раза (от точки **А** к точке **Б**), то $W_{потерь}^*$ уменьшается в 3,2 раза. И далее, при уменьшении W_C^* в 3,79 раза (от точки **Б** к точке **В**) $W_{потерь}^*$ уменьшается в 20 раз. В целом при переходе из области отрицательных значений в область положительных U_{OC} (от точки **А** к точке **В**) $W_{потерь}^*$ уменьшается в 64 раза (при уменьшении W_C^* в 4,79 раза).

Из таблицы видно, что при $Q_5 = 20$, $\eta > 0,9$ и меняется незначительно во всем диапазоне изменения U_{OC} . Другими словами соотношение для точки **А**: $W_C^* = 93\%$, и $W_{потерь}^* = 7\%$, для точки **Б** — $W_C^* = 96\%$ и $W_{потерь}^* = 4\%$, и для точки **В** — $W_C^* = 99\%$ и $W_{потерь}^* = 1\%$.

Отметим, что при $Q_5 = 20$ W_C^* за один цикл заряда конденсатора уменьшается несколько больше, чем при $Q_1 = 2$. Так при изменении U_{OC} от $U_{OC} < 0$ (точка **А**) до 0 (точка **Б**) эта доза уменьшается в 1,75 раза, а при изменении U_{OC} от 0 до $U_{OC} > 0$ (точка **В**) — в 4,84 раза. В целом при изменении U_{OC} от значений в точке **А** до значений в точке **В** W_C^* за один цикл заряда конденсатора уменьшается в 8,46 раза. Больше снижается и $W_{потерь}^*$ в этих трех рассматриваемых случаях.

Таким образом, для цепей с высокой добротностью производить заряд конденсаторов при отрицательных начальных напряжениях на конденсаторе может быть энергетически целесообразно. В этом случае мы можем иметь высокую дозу энергии, поступающую в конденсатор при высоком (более 0,9) КПД процесса заряда конденсатора. Однако, если добротность зарядного контура невысокая, то КПД заряда при отрицательных начальных напряжениях на конденсаторе мал и увеличить его можно, повышая начальное напряжение

на конденсаторе (переходя в положительную область значений). Однако при этом значения U_{Cmax} и W_C^* за один цикл заряда будут уменьшаться.

Если необходимо за одно и то же время отбирать от ИПН одинаковую дозу энергии (т.е. реализовать режим неизменной средней мощности), то это возможно при реализации условия $W_{ист}^* = W_{ист_i}^* \cdot f_i = const$, где f_i — частота зарядных циклов при $U_{OCi} \neq 0$. Причем должно выполняться и условие $f_i < \nu$, где $\nu = T/\tau_0$ — скважность, τ_0 — длительность зарядного цикла при $U_{OC} = 0$ и T — период повторения зарядных циклов (где должно быть $\nu > 1$). В таком процессе заряда можно реализовать гораздо больший КПД, чем при $U_{OC} = 0$.

Если для $W_{ист_i}^* \cdot f_i$ при $U_{OCi} \neq 0$ необходимо выполнение условия $W_{ист_i}^* \cdot f_i = W_{ист}^* |_{U_{OC} = 0}$, то значение f_i можно найти следующим образом. Подставляя в (15) значение $U_{OC} = 0$ и учитывая, что $W_{ист}^* = W_{ист} / CE^2$, получим

$$W_{ист_{OC=0}}^* = (1 + e^{-\pi/2Q}) = W_{ист_i}^* \cdot f_i,$$

где $W_{ист_i}^*$ — доза энергии, отбираемая от источника при $U_{OCi} \neq 0$. Откуда

$$f_i = \frac{1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}}{\left(1 - \frac{U_{OC}}{E}\right) \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{U_{OC}}{E}\right)}. \quad (20)$$

Как видно из выражения (20), частота циклов заряда f_i не зависит от Q . Причем математическое выражение для f_i идентично как для колебательно-го, так и для апериодического процессов заряда конденсатора.

Аналогичное выражение можно получить и для изменения величины емкости конденсатора C_i при $f = \text{const}$.

Зависимости величин f , C^* (C_i/C_0) и η при $Q_1=2$ и $Q_5=20$ от U_{0C} при стабилизации отбираемой от источника средней мощности показаны на рис. 6.

Таким образом, режимы заряда конденсатора можно реализовать с высоким КПД ($\eta \rightarrow 1$). При этом возможна также реализация неизменной потребляемой от источника мощности за время $t=T$ за счет увеличения U_{0C} и частоты зарядных циклов f (в соответствии с выражением (20)). Отметим, что при $Q_5=20$ (рис. 6, б) значения η настолько высоки на рассмотренном интервале изменения U_{0C} , что $W_{\text{ист}}^* = \text{const}$ за время $t=T$ можно реализовывать при $U_{0C} < 0$, что позволяет уменьшать величину f . Из рис. 3 видно, что реализация отрицательных начальных напряжений на конденсаторе дает возможность значительно повысить $U_{C\text{max}}^*$ (например, при $Q_3=30$ и $U_{0C} = -E$ $U_{C\text{max}}^*$ повышается почти в 3 раза). Такое повышение $U_{C\text{max}}^*$ позволяет в некоторых случаях обходиться без повышающего трансформатора.

Другим способом реализации $W_{\text{ист}}^* = \text{const}$ за время $t=T$ при заряде конденсатора при изменении на нем начального напряжения является изменение величины емкости конденсатора (при $f_i = \text{const}$). При том же допущении, что $W_{\text{ист}}^*$ за установленное время должна быть постоянной и равной $W_{\text{ист}}^*|_{\text{при } U_{0C}=0}$, используя формулу (15), можно записать

$$W_{\text{ист}}^*|_{U_{0C}=0} = C_0 \cdot E^2 \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) =$$

$$= C_i \cdot E (E - U_{0C_i}) \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right),$$

где C_0 — емкость конденсатора при $U_{0C} = 0$, а C_i — емкость конденсатора при $U_{0C_i} \neq 0$.

Тогда

$$C^* = \frac{C_i}{C_0} = \left(1 - \frac{U_{0C}}{E}\right)^{-1}.$$

Как видно из рис. 6, при реализации $W_{\text{ист}}^* = \text{const}$ зависимости C^* от f от U_{0C} совпадают. Для стабилизации потребляемой от источника мощности можно также при увеличении U_{0C_i} увеличивать произведение $f_i \cdot C_i$. Однако надо учитывать, что при увеличении емкости будет увеличиваться время заряда конденсатора и амплитудное значение тока в зарядном контуре.

Выводы. 1. С изменением U_{0C} от $+E$ до $-E$ величина напряжения заряда конденсатора $U_{C\text{max}}$ изменяется от E до значений, которые могут превышать $2E$ (и чем выше Q , тем больше величина $U_{C\text{max}}$: так при $Q=5$ $U_{C\text{max}} = 2,46E$, а при $Q=30$ $U_{C\text{max}} = 2,89E$). Повышение напряжения заряда конденсатора позволяет в некоторых случаях обходиться без повышающего трансформатора.

2. При изменении U_{0C} от $-E$ до $+E$ КПД заряда конденсатора η линейно увеличивается от некоторого минимального значения до 1. Причем чем выше Q , тем больше это минимальное значение. Так для $Q=0,5$ (граничный случай аperiодического заряда конденсатора) $\eta_{\text{min}} = 0$, для $Q=2$ — $\eta_{\text{min}} = 0,46$, а для $Q=30$ — $\eta_{\text{min}} = 0,95$.

3. При изменении U_{0C} изменяется доза энергии, поступающей в конденсатор W_C^* за один цикл заряда. Максимальной эта доза будет при начальном напряжении на конденсаторе $U_{0C} = -E$, минимальной — при $U_{0C} = +E$. Причем, чем выше Q , тем выше $W_{C\text{max}}^*$. Так, например, для $Q=2$ $W_{C\text{max}}^* = 1,33$, а для $Q=30$ — $W_{C\text{max}}^* = 3,7$.

4. При изменении U_{0C} от $-E$ до $+E$ энергия потерь $W_{\text{потерь}}^*$ на резисторе R уменьшается от максимального при $U_{0C} = -E$ до минимального зна-

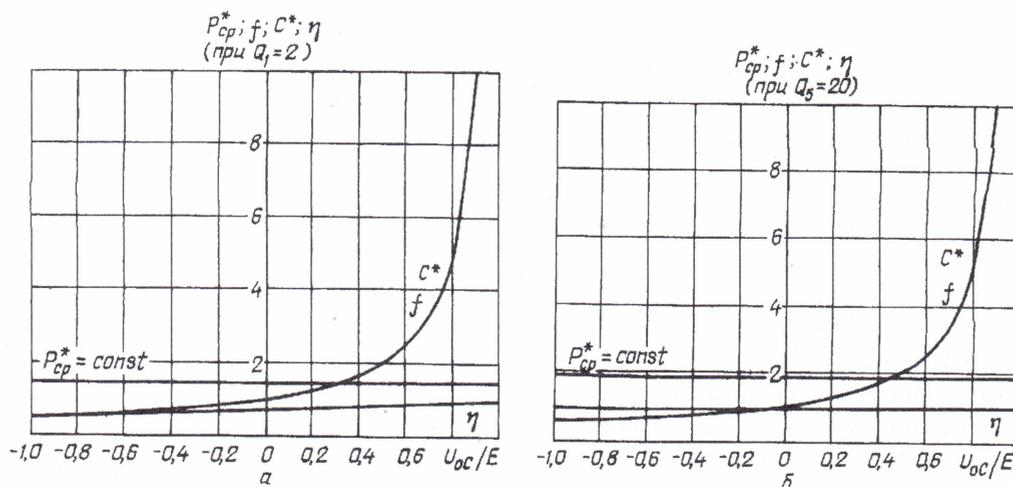


Рис. 6

чения при $U_{0C} = +E$. Причем, чем выше Q , тем меньше величина максимальных потерь в цепи. Так, например, для $Q = 2$ $W_{\text{потерь max}}^* = 1,58$, а для $Q = 30$ — $W_{\text{потерь max}}^* = 0,19$.

5. Анализ соотношения между W_C^* и $W_{\text{потерь}}^*$ показал, что по мере увеличения напряжения U_{0C} от $-E$ до $+E$ отношение W_C^* к $W_{\text{потерь}}^*$ становится все больше. И чем выше Q цепи, тем более выраженной становится эта закономерность. Так, в цепи, где $Q = 2$, W_C^* при $U_{0C} = 0,8E$ уменьшится в 4,79 раза, а $W_{\text{потерь}}^*$ — в 64 раза (по сравнению с $U_{0C} = -0,8E$). А для цепи, где $Q = 20$, при тех же условиях W_C^* уменьшится в 8,46 раз, а $W_{\text{потерь}}^*$ — в 80 раз.

6. Для цепей с невысокой добротностью ($Q < 5$) при стабилизации дозы энергии, потребляемой от источника за время $t = T_0 = f_i \cdot T_i$, можно реализовывать режимы заряда конденсатора с высоким КПД ($\eta > 0,9$), увеличивая U_{0C} при одновременном увеличении или частоты зарядных циклов конденсатора f при $C_i = \text{const}$, или емкости конденсатора C_i при $f = \text{const}$, или величины $f_i \cdot C_i$.

7. Для цепей с высокой добротностью ($Q > 10$) КПД является высоким ($\eta > 0,9$) на всем рассмотренном интервале изменения U_{0C} . Таким образом, используя высокодобротную зарядную цепь и отрицательные начальные напряжения на конденса-

торе, возможно обеспечить $W_{\text{ист}}^* = \text{const}$ за время $t = T$ при снижении величин f_i , C_i или $f_i \cdot C_i$.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология химических соединений и порошков металлов (главы 2 и 3). — Фрунзе: Илим, 1990. — 255 с.

2. Волков И.В., Вакуленко В.М. Источники электропитания лазеров. — Киев: Техніка, 1976. — 174 с.

3. Круг К.А. Основы электротехники. Физические основы электротехники. / Т. 1. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1946. — 472 с.

4. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. — М: Энергоатомиздат, 1983. — 352 с.

5. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. — Киев: Наукова думка, 1982. — 424 с.

6. Теоретические основы электротехники. / Т.1. Основы теории линейных цепей. — М.: Высш. школа, 1976. — 544 с.

7. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизации параметров полупроводниковых электроимпульсных систем электронского диспергирования слоя токопроводящих материалов // В сб. "Стабилизация параметров электрической энергии". — Киев: ИЭД АН Украины, 1991. — С. 12—30.

8. Щерба А.А. Тиристорные системы электропитания технологических установок с параметрической стабилизацией выходных характеристик // В сб. "Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии" — Киев: ИЭД НАН Украины, 1996. — С. 18—27.

Надійшла 31.03.2008