

**А.К. Шидловский**, академик НАН Украины, **Н.И. Супруновская**, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНЫХ УСТАНОВОК С ЕМКОСТНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЕГО РАЗРЯДА НА ЭЛЕКТРОИСКРОВОЮ НАГРУЗКУ И НЕНУЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ ЕГО ЗАРЯДА**

*Проведен анализ энергетических процессов в цепях электроимпульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку, электрическое сопротивление которой к окончанию разряда увеличивается в несколько раз. Обоснована целесообразность использования изменяемых условий заряда и разряда конденсаторов в таких установках для повышения их энергетических характеристик. Определен характер изменения энергетических характеристик электроимпульсных установок при ненулевых начальных условиях заряда и разряда конденсатора и обоснована целесообразность принудительного уменьшения длительности аperiodических разрядов конденсатора на электроискровую нагрузку.*

*Проведено аналіз енергетичних процесів у колах електроімпульсних установок з ємнісним накопичувачем електроенергії при обмеженні тривалості його розряду на електроіскрове навантаження, електричний опір якого до закінчення розряду збільшується в декілька разів. Обґрунтовано доцільність використання змінюваних умов заряду й розряду конденсаторів в таких установках для підвищення їхніх енергетичних характеристик. Визначено характер зміни енергетичних характеристик електроімпульсних установок при ненульових умовах заряду і розряду конденсатора та обґрунтовано доцільність примусового зменшення тривалості аперіодичних розрядів конденсатора на електроіскрове навантаження.*

**Введение.** Применение емкостных накопителей электрической энергии (ЕНЭ) в электроимпульсных установках (ЭИУ) обеспечивает получение больших импульсных мощностей и скоростей нарастания разрядных токов в нагрузке практически без возмущения режимов потребления электрической энергии от питающей сети. Поэтому разрядноимпульсные установки нашли широкое применение при разработке новых технологий электроимпульсной обработки материалов и сред (в частности, электроэрозионной, электрогидравлической, магнитоимпульсной и т. п.).

Задачи исследования энергетических процессов в разрядноимпульсных установках значительно усложняются при изменении начальных и конечных условий переходных процессов в цепях заряда и разряда ЕНЭ, вызываемых, например, необходимостью ограничения длительности аperiodических разрядных переходных процессов.

Но в большинстве публикаций переходные процессы в электрических цепях электроимпульсных установок анализировались при разряде конденсатора до нуля и заряде при нулевом на нем начальном напряжении [1]. В то же время известно, что изменение величины и знака начального напряжения на конденсаторе может быть использовано для разработки методов высокоскоростного регулирования параметров зарядного импульса, энергии в конденсаторе, коэффициента полезного действия (КПД) зарядной цепи ЕНЭ и всей ЭИУ, а также параметрической стабилизации разрядных процессов цепи нелинейной нагрузки [9,10]. Такой подход в установках объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) металлов позволил реализовать регулируемую параметрическую стабилизацию энергетически эффективных режимов разряда в электроискровой нагрузке [1,7-10].

Со временем возрастала актуальность задачи повышения энергетических характеристик электрических цепей заряда и разряда конденсаторов электроимпульсных установок при изменяемых условиях переходных процессов в этих цепях, в частности, при принудительном ограничении длительности разрядных процессов независимо от характера изменения сопротивления нагрузки.

Поэтому **целью** данной работы является обобщение результатов анализа переходных процессов в зарядных и разрядных цепях электроимпульсных установок с учетом изменения начальных и конечных условий протекания таких процессов, а также рекомендаций по повышению энергетических характеристик исследуемых цепей и уменьшению длительности импульсных токов в нелинейной нагрузке.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработаны критерии оценки энергетических характеристик апериодического и колебательного заряда конденсатора при изменяемом начальном напряжении на конденсаторе;
- установлены закономерности изменения КПД и дозы энергии, поступающей в конденсатор, и напряжения его разряда при изменении начальных условий переходных процессов;
- исследованы энергетические процессы разряда конденсатора на нелинейную нагрузку при скачкообразном изменении ее сопротивления на временных интервалах, близких к окончанию разряда.

**Проведение исследований и анализ результатов.** На рис. 1 показана схема формирователя разрядных импульсов (ФРИ) ЭИУ, для которой проводился анализ переходных процессов в зарядной, разрядной и перезарядной цепях конденсатора для реализации энергоэффективных обратных связей.

**Особенности заряда конденсатора при изменении начального напряжения.** Конденсатор емкостью  $C$  (рис.1) заряжался от формирователя постоянного напряжения (ФПН) с выходным напряжением  $U_{ФПН}$  через резистор  $R$ , катушку индуктивности  $L$  и зарядный тиристорный коммутатор  $VT$ .

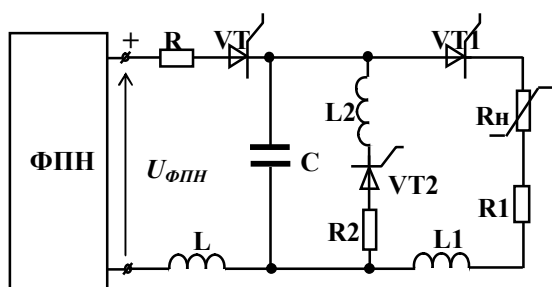


Рис. 1

Был проведен анализ *апериодического заряда* конденсатора при изменяемых начальных напряжениях на конденсаторе  $U_{0C} = var$  в диапазоне  $-U_{ФПН} < U_{0C} < +U_{ФПН}$  [8]. При этом начальные и конечные условия для тока в его зарядной цепи были нулевыми:  $i(t=0) = i(t=\infty) = 0$ . Коммутатор  $VT$  считался идеальным ключом без энергетических потерь, но его введение ограничивало продолжительность апериодического заряда конденсатора, который прекращался тогда, когда ток в цепи становился меньшим тока удержания тиристорного ключа во включенном состоянии. В работе был выбран

ток удержания  $\sim 0,5$  А, соответствующий тиристорам типа ТБ 353, рабочие токи от 250 до 1000 А [6].

Параметры зарядной цепи выбирались такими, чтобы выполнялось условие  $\sqrt{L}/(\sqrt{CR}) = Q \leq 0,5$ , где  $Q$  — добротность зарядной цепи.

Определены следующие характеристики зарядной цепи [8], они приведены в табл. 1:

— доза энергии, отбираемая от ФПН, и доза, поступающая в конденсатор за время его заряда,:

$$W_{ФПН} = C U_{ФПН} (U_{ФПН} - U_{0C}); \quad W_C = C(U_{ФПН}^2 - U_{0C}^2)/2; \quad (1,2)$$

— энергия потерь в зарядной цепи и КПД заряда конденсатора:

$$W_{потерь} = W_{ФПН} - W_C = C(U_{ФПН} - U_{0C})^2/2; \quad \eta = W_C / W_{ФПН} = (U_{ФПН} + U_{0C})/2U_{ФПН}. \quad (3,4)$$

Таблица 1

$U_{0C}/U_{ФПН}$	0	0,5	0,8
$W_{потерь}^*$	0,5	0,125	0,02
$W_C^*$	0,5	0,375	0,18
КПД, $\eta$	0,5	0,75	0,9
$W_{ФПН}^*$	1	0,5	0,2

Как видно, привычное значение КПД  $\eta = 0,5$  [2] имеет место только при нулевом начальном напряжении на конденсаторе, а при увеличении начального напряжения  $U_{0C}$   $\eta \rightarrow 1$ . Но при изменении величины  $U_{0C}$  изменяется и доза энергии  $W_C$ , поступающая в конденсатор от ФПН, поэтому были исследованы пути стабилизации средней мощности, потребляемой от ФПН. Было показано, что такую стабилизацию можно осуществить, изменяя величину емкости  $C$  и/или частоту  $f$  заряда конденсатора за единицу времени [8]. Таким образом, был разработан метод стабилизации дозы энергии, потребляемой от ФПН за продолжительное время  $T$ , при заряде конденсатора с КПД  $\eta \approx 0,8 - 0,9$ .

В мощных ЭИУ обычно используется *колебательный заряд* конденсатора, поэтому в работе были определены энергетические характеристики зарядной цепи за время заряда конденсатора до момента отключения тока тиристорным коммутатором ( $t = t_{U_{max}} = \pi/\omega_0$ ) [7]

$$W_{ФПН} = CU_{ФПН}^2 \beta (1 + e^{-\pi/2Q}); \quad W_C = CU_{ФПН}^2 \beta (1 + e^{-\pi/2Q}) \{1 - 0,5\beta (1 - e^{-\pi/2Q})\} \quad (5,6)$$

$$\eta = W_C / W_{ФПН} = 1 - 0,5\beta (1 - e^{-\pi/2Q}), \quad \text{где } \beta = 1 - U_{0C} / U_{ФПН}. \quad (7)$$

Исследована зависимость максимального напряжения, до которого зарядится конденсатор при колебательном заряде от ФПН за время  $t = \pi/\omega_0$ , от начальных напряжений на конденсаторе [7]. Было показано, что при определенных условиях величина напряжения заряда конденсатора может превышать двойное напряжение ФПН (например, при начальном напряжении на конденсаторе  $U_{0c} = -U_{ФПН}$  и добротности контура  $Q = 30$  конденсатор зарядится до напряжения  $U_{1c} \approx 3 U_{ФПН}$ ). Таким образом, в некоторых случаях можно обходиться без повышающего трансформатора.

На рис. 2 показаны приведенные к  $CU_{ФПН}^2$  зависимости дозы энергии  $W_C^*$ , поступающие в конденсатор (рис. 2,а), и КПД зарядной цепи  $\eta$  (рис. 2,б) от начального напряжения на конденсаторе ( $U_{0c} / U_{ФПН}$ ) при различных добротностях зарядной цепи. Из рис.2 видно, что при  $Q \geq 20$  значения  $\eta > 0,9$  во всем диапазоне изменения  $U_{0c}$ . При этом использование значений  $U_{0c} < 0$  дает возможность повышать напряжение заряда до значений, превышающих  $2U_{ФПН}$ .

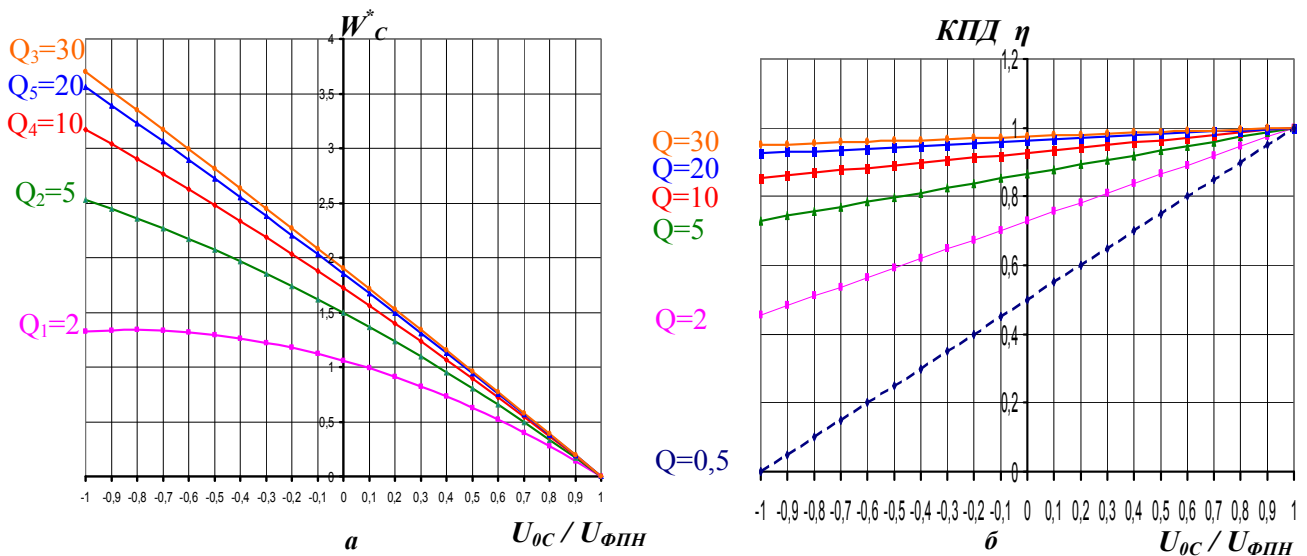


Рис. 2

Анализ соотношения между дозой энергии, поступающей в конденсатор, и энергией потерь при изменяемых начальных напряжениях на конденсаторе в диапазоне  $-U_{ФПН}$  до  $+U_{ФПН}$  позволил определить энергоэффективные режимы как для аperiodического, так и для колебательного зарядов конденсатора. Так, например, для аperiodического заряда определен режим, в котором энергия потерь уменьшается в 25 раз, а поступающая в конденсатор доза энергии – меньше, чем в 3 раза. Для колебательного процесса определен режим, в котором энергия потерь уменьшается в 80 раз при уменьшении поступающей в конденсатор дозы энергии в 8 раз.

Было установлено, что для аperiodического и колебательного процессов являются идентичными выражения, определяющие  $f$  и  $C^*$ , при которых от ФПН потреблялась неизменная мощность [7,8], а также что при аperiodическом и колебательном зарядах конденсатора от ФПН КПД линейно увеличивается с увеличением величины начального напряжения  $U_{0c}$ .

В колебательной цепи при увеличении напряжения  $U_{0c}$  возрастает также отношение  $W_C^*$  к  $W_{потерь}^*$ , причем, чем выше добротность  $Q$ , тем больше это возрастание. Таким образом, возможно реализовать заряд конденсатора с высоким КПД ( $\eta > 0,7$  как для аperiodических, так и для колебательных режимов) за счет увеличения начального напряжения  $U_{0c}$ , причем в высокодобротных зарядных цепях ( $Q \geq 20$ ) возможно повышать напряжение заряда конденсатора до  $U_{Cmax}^* > 2 U_{ФПН}$  (в 1,6 раза) при  $\eta > 0,9$ .

**Особенности разряда конденсатора на электроискровую нагрузку.** Известно, что сопротивление некоторых электрических нагрузок функционально зависит от напряжения заряда конденсатора. Поэтому важно иметь возможность регулирования этого напряжения.

На рис. 3, а показаны характерные изменения электрического сопротивления электроискровой нагрузки в установках ОЭИД металлов. Сопротивление такой нагрузки нелинейно изменяется от разряда к разряду в зависимости от многих факторов. Поэтому в исследованиях оно оценивалось по усредненному по данным многих экспериментов изменению сопротивления за длительность периода повторения разрядов (кривая 1 на рис. 3, б).

Для анализа энергетических процессов обычно использовалось линейное сопротивление нагрузки (прямая 2 на рис. 3, б), определяемое как  $R_{н0} = \frac{\int_0^{\tau_{ПИ}} i^2(t) R_n(t) dt}{\int_0^{\tau_{ПИ}} i^2(t) dt}$ , где  $\tau_{ПИ}$  – длительность разрядного импульса тока  $i(t)$ .

Из рис. 3 видно, что сопротивление электроискровой нагрузки к окончанию разрядного импульса тока экспоненциально увеличивается во много раз. Это увеличение аппроксимировалось ступенчатой функцией (ломаная линия 3 на рис. 3, б)  $R'_n(t) = \begin{cases} R'_{н1}, & 0 < t \leq t_1; \\ R'_{н2}, & t_1 < t \leq t_2. \end{cases}$ , которая отражает скачко-

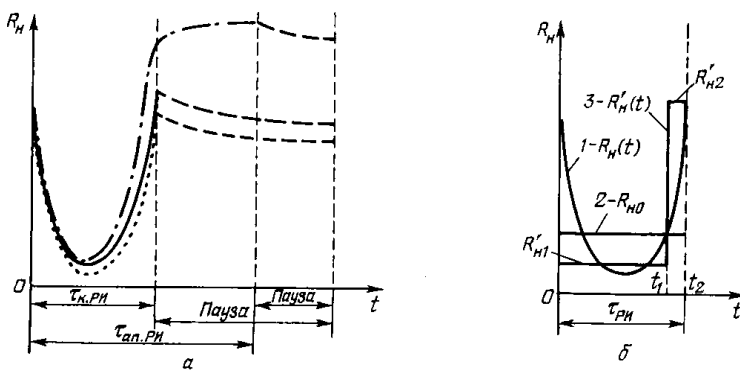


Рис. 3

образное увеличение сопротивления нагрузки в конце разрядного импульса и является более точной энергетической моделью нелинейного сопротивления  $R_n(t)$ , чем  $R_{н0}$ . Представление  $R'_n(t) = R'_{н1}$  при  $0 < t \leq t_1$  основывалось на том, что изменение  $R_n(t)$  до максимума тока достаточно детерминировано, и поэтому в этом временном интервале для такого сопротивления можно довольно просто найти энергетически эквивалентное линейное сопротивление.

При работе на электроискровую нагрузку параметры разрядной цепи подбираются таким образом, чтобы был реализован колебательный разряд накопительного конденсатора [1,3,4,7–10]. Это дает возможность формировать в нагрузке искроразрядные импульсы длительностью 20-80 мкс и реализовывать высокие частоты разрядных циклов, а также производительность ЭИУ. Но электрическое сопротивление такой нагрузки к концу разрядного импульса может скачкообразно увеличиться случайным образом в несколько раз, что вызывает возникновение длительного аperiodического разряда конденсатора на нагрузку. Длительность импульсных токов в нагрузке может возрасти в 20 и более раз, что является недопустимым. Для устранения таких режимов в ЭИУ параллельно нагрузке обычно подключают шунтирующий резистор, в котором потери электроэнергии составляют более 50 %. Но и при этом длительность разрядных импульсов в нагрузке уменьшается всего в 2–6 раз.

Отметим, что скачкообразное увеличение сопротивления нагрузки в ходе разряда конденсатора вызывает новый переходный процесс при ненулевых начальных условиях как по напряжению на конденсаторе, так и по току через разрядную индуктивность. В результате анализа такого двухстадийного переходного процесса были получены выражения для напряжения на конденсаторе и тока в разрядной цепи при указанных ненулевых начальных условиях для всех возможных режимов разряда конденсатора [3,5]:

– аperiodического разряда ( $Q_1 < 0,5$ )

$$u_c = \frac{e^{-R_p t / 2L_1}}{2Ca} \left[ e^{at} \left( U_0 C \left( a + \frac{R_p}{2L_1} \right) - I_0 \right) + e^{-at} \left( U_0 C \left( a - \frac{R_p}{2L_1} \right) + I_0 \right) \right]; \quad (8)$$

$$i_1 = \frac{e^{-R_p t / 2L_1}}{2a} \left[ e^{at} \left( \frac{U_0}{L_1} + \left( \frac{R_p}{2L_1} - a \right) I_0 \right) + e^{-at} \left( -\frac{U_0}{L_1} + \left( a + \frac{R_p}{2L_1} \right) I_0 \right) \right], \quad (9)$$

где  $a = \sqrt{R_p^2 / 4L_1^2 - (L_1 C)^{-1}}$ ;

— критического (предельного) апериодического разряда ( $Q_1 = 0,5$ )

$$u_c = e^{-\frac{R_p t}{2L_1}} \left( U_0 - t \left( \frac{I_0}{C} - \frac{U_0 R_p}{2L_1} \right) \right), \quad i_1 = -C e^{-\frac{R_p t}{2L_1}} \left( -\frac{U_0 R_p}{2L_1} - \left( \frac{I_0}{C} - \frac{U_0 R_p}{2L_1} \right) \left( 1 - \frac{R_p t}{2L_1} \right) \right) \quad (10,11)$$

— колебательного разряда ( $Q_1 > 0,5$ )

$$u_c = e^{-R_p t / 2L_1} \left[ \frac{1}{b} \left( \frac{U_0 R_p}{2L_1} - \frac{I_0}{C} \right) \sin bt + U_0 \cos bt \right], \quad i_1 = e^{-R_p t / 2L_1} \left[ \frac{1}{b} \left( \frac{U_0}{L_1} - \frac{I_0 R_p}{2L_1} \right) \sin bt + I_0 \cos bt \right] \quad (12,13)$$

где  $b = \sqrt{(L_1 C)^{-1} - R_p^2 / 4L_1^2}$ ,  $R_p = R_n + R_l$ , а  $Q_1$  – добротность разрядной цепи.

Был проведен анализ увеличения длительности переходных процессов в разрядной цепи конденсатора при скачкообразном увеличении сопротивления нагрузки в 5, 10, 20 раз в момент времени, близкий к окончанию импульсного тока в нагрузке при колебательных разрядах. Анализ показал, что скачкообразное увеличение сопротивления нагрузки при разрядном токе, равном по величине 85% своего амплитудного значения, приводит к значительному удлинению процесса разряда конденсатора. Так, увеличение  $R_{н0}$  в 5 раз увеличило длительность  $\tau_{\text{ри}}$  в 7 раз. При увеличении  $R_{н0}$  в 10 и 20 раз длительность  $\tau_{\text{ри}}$  увеличилась соответственно в 13 и 23 раза.

**Энергетические процессы при регулировании длительности разрядных токов.** С энергетической точки зрения оптимальным является критический разряд конденсатора, когда вся его энергия рассеивается в цепи нагрузки. Однако для реализации многократных зарядно-разрядных циклов такие режимы непригодны из-за неоправданно больших длительностей переходных процессов.

Для разработки эффективного метода уменьшения длительности разрядных импульсов проведены исследования энергетических параметров в цепи разряда конденсатора ( $C-VT_1-R_n-R_l-L_1-C$ , рис. 1) на электроискровую нагрузку и проанализировано соотношение энергии, рассеянной в нагрузке, и энергии, оставшейся в реактивных элементах цепи к рассматриваемому моменту времени [3] (табл.2).

**Таблица 2**

		$t$ , мкс	60	70	80	90	100
$Q_1 = 0,3$ $\tau_{\text{ри}} = 522$ мкс	$W_n^*(t)$		76,5	82,6	87,1	90,4	92,6
	$W_c^*(t)$		23,5	17,4	12,9	9,6	7,1
	$W_L^*(t)$   $W_c^*(t)$	2,3   21,1	1,7   15,7	1,3   11,6	0,96   8,6	0,71   6,4	
$Q_1 = 0,5$ $\tau_{\text{ри}} = 252$ мкс	$W_n^*(t)$		90,2	94,8	97,3	98,6	99,3
	$W_c^*(t)$		9,8	5,2	2,7	1,4	0,007
	$W_L^*(t)$   $W_c^*(t)$	3,4   6,4	1,9   3,3	1   1,7	0,006   0,008	0,003   0,004	
$Q_1 = 0,7$ $\tau_{\text{ри}} = 100$ мкс	$W_n^*(t)$		95	98,4	99,5	99,8	99,8
	$W_c^*(t)$		5	1,6	0,5	0,18	0,16
	$W_L^*(t)$   $W_c^*(t)$	1   4	0,1   1,5	0,2   0,3	0,12   0,06	0   0,16	
$Q_1 = 1$ $\tau_{\text{ри}} = 81$ мкс	$W_n^*(t)$		94,7	97	97,3	97,3	97,3
	$W_c^*(t)$		5,3	3	2,7	2,7	2,7
	$W_L^*(t)$   $W_c^*(t)$	4,9   0,4	1   2	0,007   2,693	0   2,7	0   2,7	
$Q_1 = 1,5$ $\tau_{\text{ри}} = 75$ мкс	$W_n^*(t)$		87,5	89,1	89,1	89,1	89,1
	$W_c^*(t)$		12,5	10,9	10,9	10,9	10,9
	$W_L^*(t)$   $W_c^*(t)$	6,2   6,3	0,5   10,4	0   10,9	0   10,9	0   10,9	

В табл. 2 приведены результаты анализа изменения во времени энергии  $W_n^*(t)$ , переданной в нагрузку, а также энергии  $W_k^*(t)$ , оставшейся в реактивных элементах контура, и ее составляющих  $W_C^*(t)$  и  $W_L^*(t)$  - энергий, оставшихся соответственно в конденсаторе и катушке индуктивности, при разных добротностях разрядного контура  $Q_1$ . Все энергии даны в относительных единицах, они приведены к величине  $W_{C0}$  - энергии, накопленной в конденсаторе при нулевом начальном напряжении.

Анализ данных табл. 2, показал, что при еще довольно больших токах в контуре (от 40 до 60% от амплитудного значения) большая часть (от 77 до 95%) энергии конденсатора уже рассеялась в разрядной цепи. При этом время, за которое энергия рассеялась в нагрузку, для апериодических режимов разряда конденсатора во много раз меньше длительности этого разрядного процесса (до 9 раз), поэтому разряд через нагрузку можно прерывать.

Такое прерывание осуществлялось включением в определенный момент времени дополнительного тиристора, шунтирующего нагрузку, и определены условия по выбору этого момента [3,5].

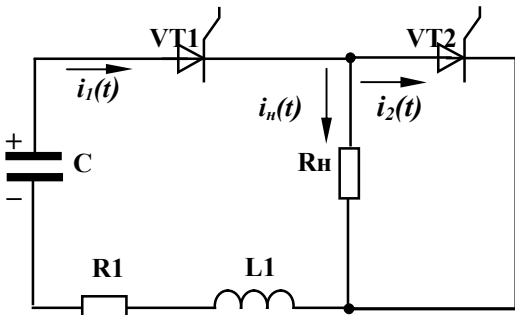


Рис. 4

сопротивление нагрузки  $R_n$ ; начальная добротность разрядного контура  $Q_1 = 0,3$  б) тока  $i_2(t)$ , проходящего через тиристорный коммутатор  $VT_2$  после его включения в момент  $t_1 = 60$  мкс;  $Q_1 = 30$  в) тока в цепи  $i_1(t)$  с учетом обоих переходных процессов: включения  $VT_1$  и включения  $VT_2$  ( $t_2$  - время закрытия тиристора  $VT_2$ ); начальная добротность  $Q_1 = 0,3$ , а после включения тиристора  $VT_2 - Q_1 = 30$ .

Анализ показал, что включение в момент времени  $t_1$  шунтирующего тиристора  $VT_2$  уменьшает длительность разряда конденсатора в 2 - 4 раза и строго фиксирует время протекания импульса тока через нагрузку. Потери энергии при этом увеличиваются на 5 - 23%, что является вполне приемлемым по сравнению с получаемым преимуществом - возможностью повышения частоты разрядных циклов.

Проводилось также численное моделирование, выполненное в пакете MATLAB/ SIMULINK. Нелинейное сопротивление электроискровой нагрузки при этом моделировалось функцией, отражающей U-образный характер его изменения  $R_n(i) = (R_0 - R_{\min})e^{-i/I_R} + R_{\min}$ , где  $R_0$  и  $R_{\min}$  - соответственно начальное и минимальное значение  $R_n$ , а  $I_R$  - величина тока, при которой  $R_n$  уменьшается в  $e = 2,71$  раз [5].

Проводились также экспериментальные исследования разряда конденсатора на электроискровую нагрузку, представляющую собой слой алюминиевых гранул между электродами, погруженными в воду. Анализ показал достаточно точное совпадение полученных зависимостей тока в разрядной цепи и напряжения на конденсаторе при аналитическом расчете переходных процессов разряда конденсатора на электроискровую нагрузку при шун-

На рис. 4 показана разрядная цепь накопительного конденсатора, в которой в определенный момент  $t_1 = (2 \div 3) \cdot t'$  (где  $t'$  - время нарастания тока до амплитудного значения) подключается шунтирующий тиристор  $VT_2$ .

На рис.5 показаны результаты исследования переходных процессов в этой цепи: а) тока  $i_n(t)$ , проходящего через

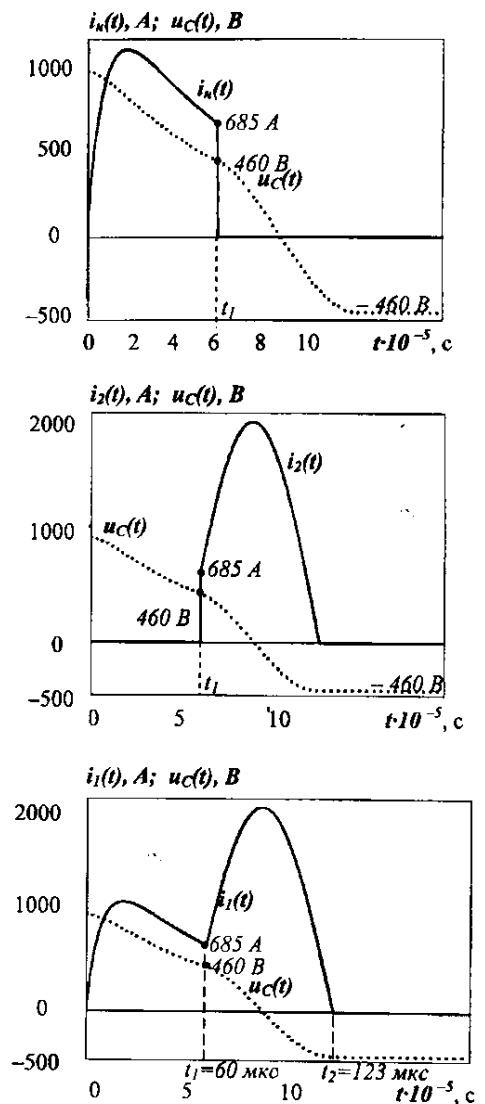


Рис. 5, а, б, в

тировании ее тиристором  $VT_2$  в определенный момент времени с соответствующими зависимостями, полученными при моделировании и снятыми в ходе эксперимента (ошибка составляла 0,5 – 5 %).

**Выводы.** 1. Для повышения энергетических характеристик зарядно-разрядных цепей конденсатора в электроимпульсных установках при заряде конденсатора от формирователя постоянного напряжения и последующем его разряде на электроискровую нагрузку, электрическое сопротивление которой может скачкообразно увеличиться в несколько раз, целесообразным является использование изменяемых условий заряда и разряда конденсатора.

2. Установленные закономерности изменения КПД и дозы энергии в элементах зарядного контура конденсатора при изменении начальных условий переходного процесса позволяют осуществить выбор интервала изменения начальных напряжений на конденсаторе с целью повышения КПД апериодического процесса заряда на 20–30 %, а напряжения колебательного заряда – в 1,6 раза.

3. Временной интервал, за который в электроискровой нагрузке поглощается 90% энергии накопительного конденсатора, почти в 9 раз меньше, чем длительность апериодического разряда конденсатора. Включение по истечении указанного времени тиристора, шунтирующего нагрузку, позволяет в 2–4 раза уменьшать длительность апериодических разрядов и жестко регулировать время протекания импульсного тока через нагрузку. Это дает возможность увеличить частоту зарядно-разрядных циклов конденсатора и исключить аварийные режимы установки, возникающие при больших длительностях импульсных токов в нагрузке.

4. Изменение момента включения тиристора, шунтирующего электроискровую нагрузку, может быть положено в основу метода энергоэффективного регулирования длительности импульсных токов в нагрузке независимо от стохастического изменения ее сопротивления.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология химических соединений и порошков металлов. – Фрунзе: Илим, 1990. – 255с.

2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей – М.: Энергия, 1975. – 752 с.

3. Супруновская Н.И. Переходные процессы при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку и ограничении длительности протекающих в ней импульсных токов // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 5. – С. 20–26.

4. Супруновская Н.И. Энергетические характеристики при изменении начальных условий колебательного заряда конденсатора от источника постоянного напряжения // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 27–33.

5. Супруновская Н.И., Шевченко Н.И., Подольцев А.Д. Моделирование и анализ импульсных процессов в электроискровой нагрузке и разрядном контуре конденсатора // Техн. електродинаміка Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2008. – Ч.3. – С. 109–114.

6. *Тиристоры*: Справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.

7. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А. Формирование выходных характеристик преобразователя с учетом свойств объемной электроэрозионной нагрузки // Техн. електродинаміка. – 1988. – №1. – С. 28–34.

8. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Повышение энергетических характеристик при апериодической зарядке конденсатора от источника постоянного напряжения за счет изменения начальных напряжений на конденсаторе // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2008. – Вип.19. – С. 113–119.

9. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизации параметров полупроводниковых электроимпульсных систем электроискрового диспергирования слоя токопроводящих материалов // Стабилизация параметров электрической энергии. – Киев: ИЭД АН Украины, 1991. – С.12–30.

10. Щерба А.А. Тиристорные системы электропитания технологических установок с параметрической стабилизацией выходных характеристик // Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии. – Киев: ИЭД НАНУ, 1996. – С.18–27.

Надійшла 10.11.09