

МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДНЫХ ТОКОВ НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

А.А. Щерба, чл.-корр. НАН Украины, Н.И. Супруновская, канд. техн. наук, С.С. Розискулов, асп., О.А. Белецкий, асп.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина
E-mail: iednat1@gmail.com

Исследованы особенности изменения средней скорости нарастания тока в разрядном контуре накопительного конденсатора и импульсной мощности в искроэрозионной нагрузке при формировании в ней разрядных импульсов с положительной и отрицательной обратными связями по напряжению. Разработан метод повышения скорости нарастания тока и импульсной мощности в нагрузке за счет увеличения емкости разряжаемого конденсатора и принудительного ограничения длительности разрядного тока. Результаты получены в соответствии с планами фундаментальной НИР "ИМРОЗ". Библ. 12, рис. 8, табл. 4.

Ключевые слова: конденсатор, разряд, электроискровая нагрузка, изменение тока, импульсная мощность.

1. Изменение скорости нарастания разрядных токов в электрической цепи искроэрозионной нагрузки. Предварительные исследования показали, что уменьшение длительности разрядных импульсов и увеличение скорости нарастания разрядных токов в установках объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) металлов и сплавов в диэлектрической жидкости способствуют уменьшению размеров получаемых искроэрозионных частиц [1, 9–12]. Поэтому они могут быть положены в основу метода регулирования размеров получаемых искроэрозионных частиц и активности коллоидных систем.

Исследования были направлены на выявление особенностей переходных процессов разряда накопительного конденсатора на электроискровую нагрузку и закономерностей, увеличивающих скорость нарастания разрядного тока и средней импульсной мощности в нагрузке. При этом допускалось, что в течение разрядного импульса сопротивление нагрузки R_n не изменялось, хотя оно может изменяться случайным образом от разряда к разряду (во время заряда конденсатора или паузы между его зарядом и разрядом).

На рис. 1 представлена электрическая схема формирователя разрядных импульсов технологических установок электроискрового диспергирования металлов в диэлектрической жидкости. Заряд накопительного конденсатора C в ней осуществлялся от формирователя постоянного напряжения (ФПН) по контуру ФПН- L_1 - K_1 - C - R_1 - ФПН, а его разряд – по контуру C - K_2 - R_n - R_2 - L_2 - C .

Известно, что величина тока в разрядном контуре конденсатора определяется величиной напряжения его заряда (U_{0C}), а также параметрами разрядного контура: электрическим сопротивлением технологической нагрузки (R_n), емкостью конденсатора C , индуктивностью и активным сопротивлением контура (R_2 и L_2).

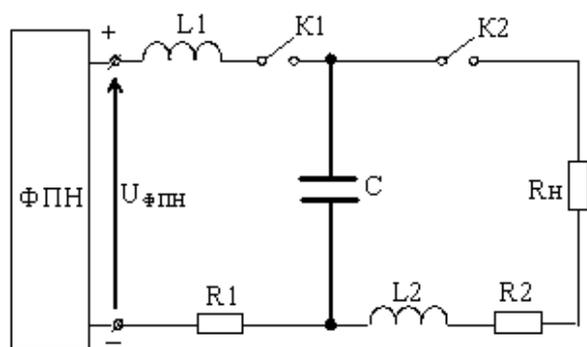


Рис. 1

Наиболее простая электрическая схема замещения такого разрядного контура для случая, когда нагрузку можно представить линейным активным сопротивлением, может рассматриваться как последовательный RLC -контур, где R – суммарное активное сопротивление нагрузки (R_n+R_2), L – индуктивность разрядного контура (L_2), C – емкость разряжаемого конденсатора [1, 3, 4].

Если добротность разрядного контура конденсатора $Q > 2$, то длительность первого полупериода разрядного тока Δt можно определить по формуле $\Delta t \approx \pi\sqrt{LC}$, а максимальное значение разрядного тока I_{\max} при этом можно рассчитать как $I_{\max} \approx U_{0C}\sqrt{C}/\sqrt{L}$, где U_{0C} – начальное напряжение на конденсаторе при его разряде [4]. Таким образом, если при таком режиме разряда уменьшать величину индуктивности контура L , то будет уменьшаться длительность Δt разрядного тока и увеличиваться его амплитудное значение I_{\max} (следовательно, скорость нарастания тока до I_{\max} будет возрастать). Поэтому при реализации большинства импульсных технологий стараются уменьшать величину L [1–5, 9–11]. Однако такое уменьшение имеет свой конструктивный предел. Для большинства электроискровых установок предельным наименьшим значением индуктивности разрядного контура является $L \sim 0,5–1$ мкГн.

Увеличение напряжения заряда накопительных конденсаторов более 1000 В имеет серьезные технические ограничения, увеличивает сложность обслуживания электроразрядных установок и часто экономически не оправдано. Увеличение емкости накопительных конденсаторов C вызывает увеличение амплитудного значения тока I_{\max} в \sqrt{C} раз, но практически во столько же раз увеличивает и длительность первого полупериода разрядного тока Δt . Поэтому среднее значение скорости нарастания тока от 0 до I_{\max} при существенно колебательных режимах разряда конденсаторов практически не зависит от величины их емкости [3, 4]. Проведенные исследования показали, что при слабоколебательных и аperiodических режимах разряда конденсатора время нарастания разрядного тока от нуля до максимального значения увеличивается, а средняя скорость его нарастания уменьшается. Причем по сравнению со слабоколебательными режимами значения средней скорости нарастания разрядных токов до максимального значения в аperiodических режимах становятся еще меньше [6–8].

Проводились дополнительные исследования режимов разряда конденсатора на других временных отрезках переходных процессов.

Анализ скорости нарастания тока до значения, меньшего, чем амплитудное при колебательном разряде конденсатора. На рис. 2 представлены зависимости разрядного тока в колебательных режимах разряда конденсатора на нагрузку при увеличении емкости накопительного конденсатора C (другие параметры разрядной цепи не изменялись: $U_{0C} = 500$ В, $L = 10^{-6}$ Гн, $R = 0,1$ Ом).

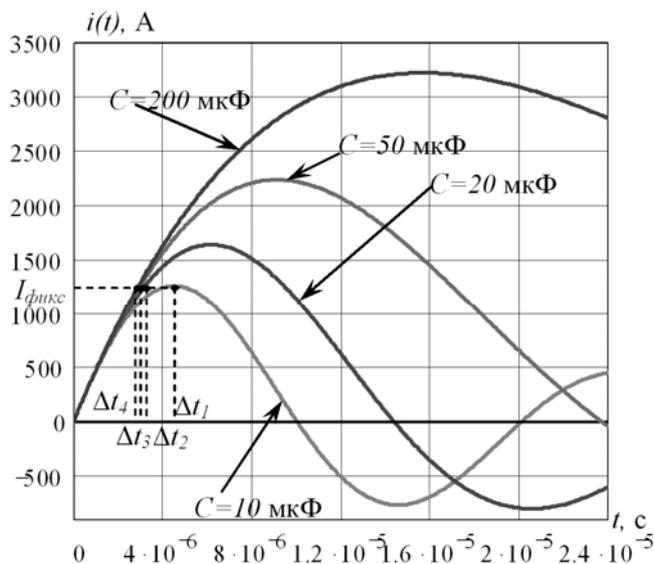


Рис. 2

время достижения током в нагрузке некоторого фиксированного значения, меньшего амплитудного значения, уменьшается, а следовательно, скорость нарастания тока в нагрузке от нуля до этого фиксированного значения $I_{\text{фикс}}$ увеличивается. Так, например, при увеличении емко-

Проведен анализ изменения средней скорости нарастания разрядных токов в нагрузке от нуля до некоторого фиксированного значения, меньшего их амплитудных значений (это фиксированное значение тока принималось равным наименьшему из всех амплитудных значений – 1261 А).

В табл. 1 приведены результаты этого анализа, а также представлены длительности времени $\Delta t_{\text{фикс } i}$, за которые разрядные токи в нагрузке достигнут фиксированного значения $I_{\text{фикс}}$, и средние скорости нарастания токов от нуля до фиксированного значения $-I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс } i}$.

Из данных табл. 1 следует, что с ростом величины емкости конденсатора при его колебательном разряде на нагрузку

сти конденсатора C от 10 до 20 мкФ средняя скорость нарастания тока до $I_{\text{фикс}}$ возрастает на 40 %, и при дальнейшем увеличении величины емкости до 50 (200) мкФ она продолжает возрастать соответственно до 50 (55) %.

Таблица 1

C , мкФ	10	20	50	200
Q	3,2	2,2	1,4	0,7
$I_{\text{фикс}}$, А	1261	1261	1261	1261
$\Delta t_{\text{фикс } i}$, мкс	4,5	3,2	3,0 ⁶	2,9
$I_{\text{фикс}} / \Delta t_{\text{фикс } i}$, А/мкс	278,6	390,8	418,2	430,9

денсатора колебательный разрядный процесс становится все более затухающим и переходит в апериодический.

Анализ скорости нарастания тока до значения, меньшего, чем амплитудное при апериодическом разряде конденсатора. Для определения зависимости средней скорости нарастания тока в диапазоне от 0 до некоторого фиксированного значения $I_{\text{фикс}}$ (меньшего амплитудного значения тока) от емкости конденсатора C были исследованы переходные процессы его апериодического разряда в цепи при разных емкостях C (другие параметры разрядной цепи не изменялись).

На рис. 3 представлены графические зависимости разрядных токов при таких переходных процессах, а в табл. 2 – результаты их анализа по параметрам, аналогичным параметрам, приведенным в табл. 1.

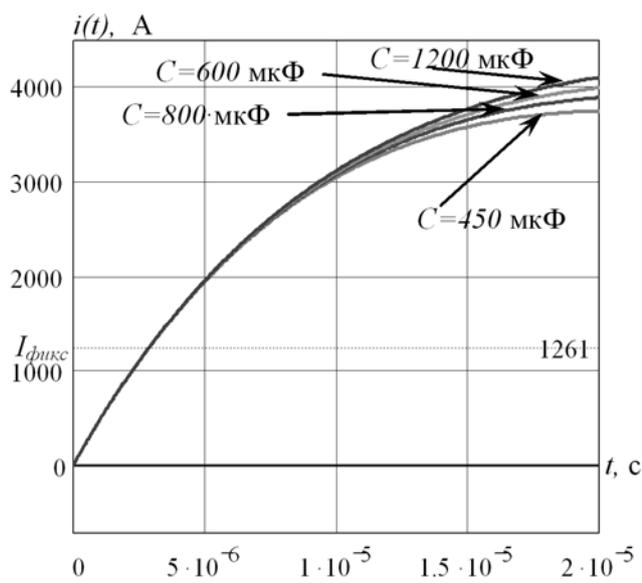


Рис. 3

Таблица 2

C , мкФ	450	600	800	1200
Q	0,47	0,4	0,35	0,29
$I_{\text{фикс}}$, А	1261	1261	1261	1261
$\Delta t_{\text{фикс } i}$, мкс	2,916	2,914	2,912	2,910
$I_{\text{фикс}} / \Delta t_{\text{фикс } i}$, А/мкс	432,44	432,74	433,04	433,33

растания) изменяется не существенно. Так, при увеличении емкости конденсатора от 200 до 1200 мкФ, когда максимальное значение тока увеличивается от 3224 до 4255 А, а фиксирован-

Следовательно, можно заключить, что на временных интервалах, соответствующих увеличению разрядного тока от нуля до некоторого фиксированного значения ниже амплитудного, увеличение емкости разряжаемого конденсатора приводит к повышению средней скорости нарастания тока. При дальнейшем росте емкости конденсатора колебательный разрядный процесс становится все более затухающим и переходит в апериодический.

Из данных в табл. 2 следует, что на временных интервалах, соответствующих увеличению разрядного тока от нуля до некоторого фиксированного значения ниже максимального, увеличение емкости разряжаемого конденсатора также приводит к повышению средней скорости нарастания тока.

Сравнивая данные табл. 1 и 2, необходимо отметить, что средние скорости нарастания тока до фиксированного значения ниже максимального (1261 А) в апериодических разрядах выше, чем в колебательных. Так, при увеличении емкости конденсатора от 10 до 450 мкФ средняя скорость нарастания тока $I_{\text{фикс}} / \Delta t_{\text{фикс } i}$ увеличивается на 55 %.

Необходимо отметить, что при увеличении емкости конденсатора, когда колебательные его разряды переходят в апериодические (в случае большого отличия между максимальным значением возможного разрядного тока и выбираемым фиксированным его значением в технологической нагрузке), длительность импульсного тока в нагрузке (а следовательно, и средняя скорость его нарастания) изменяется не существенно. Так, при увеличении емкости конденсатора от 200 до 1200 мкФ, когда максимальное значение тока увеличивается от 3224 до 4255 А, а фиксирован-

ное значение тока $I_{\text{фикс}} \approx 1261$ А (т.е. более чем в 3 раза меньше), средняя скорость нарастания тока $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$ увеличивается только на 0,6 %.

В случае $C > C_{\text{кр}}$, при котором $\alpha^2 \gg \omega_0^2$ (где $\alpha = (R_n + R_2) / 2L_2$, $\omega_0 = (1/L_2C)^{1/2}$), кривая разрядного тока асимптотически приближается к кривой, описанной выражением

$$i(t) \approx U_{0C} \left(1 - e^{-(R_n + R_2)t/L_2} \right) / (R_n + R_2).$$

При дальнейшем увеличении емкости C максимальное значение тока $I_{\text{макс}} \rightarrow U_{0C}/(R_n + R_2)$, если $t \rightarrow \infty$. Поэтому чрезмерное увеличение емкости C конденсатора, разряжаемого на линейную нагрузку, все меньше изменяет значения $\Delta t_{\text{фикс}}$ и скорость нарастания тока $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$. В то же время при $C < C_{\text{кр}}$ увеличение емкости разряжаемых конденсаторов и принудительное прерывание разрядного тока являются эффективным методом уменьшения значения $\Delta t_{\text{фикс}}$ и увеличения значения $I_{\text{фикс}}/\Delta t_{\text{фикс}}$ как для колебательных, так и апериодических режимов разряда конденсатора на линейную нагрузку.

Таким образом, наилучшие результаты по повышению средней скорости нарастания тока получаются для таких фиксированных его значений, которые ниже возможных максимальных значений тока не более чем в 1,5...2 раза.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о целесообразности использования метода формирования мощных разрядных импульсов с повышением скорости нарастания токов в нагрузке за счет увеличения емкости разряжаемых конденсаторов и принудительного прерывания разрядного тока раньше, чем он достигнет своего максимального значения.

Современные высокочастотные полностью управляемые полупроводниковые ключи позволяют прерывать токи в сотни ампер за время 0,01...0,1 мкс. Использование таких ключей позволяет принудительно отключать токи в контуре разряда накопительных конденсаторов гораздо раньше, чем они достигнут своих максимально возможных значений. Это позволяет значительно увеличивать емкость конденсатора, в результате чего колебательный разряд становится все более затухающим и переходит в апериодический разряд, при котором средняя скорость нарастания тока выше по сравнению с колебательными режимами.

Ранее апериодический режим разряда являлся неприемлемым для электроискровых технологий из-за недопустимо большой длительности протекания разрядного импульса и, как следствие, невозможности реализации высоких частот технологических зарядно-разрядных циклов.

В то же время такой метод формирования в нагрузке разрядных токов с повышенной скоростью их нарастания может быть эффективен в установках объемного электроискрового диспергирования слоя металлических гранул в диэлектрической жидкости между электродами, поскольку электрическое сопротивление такой электроискровой нагрузки не является линейным. Оно изменяется во времени по закону U -образной функции (при увеличении тока до максимального значения сопротивление нагрузки уменьшается до минимальной величины, а затем при уменьшении разрядного тока опять увеличивается) [1, 4, 6–8]. Для таких установок по мере уменьшения сопротивления нагрузки при нарастании импульсного тока добротность разрядной цепи Q будет увеличиваться по сравнению с разрядным режимом при линейном сопротивлении нагрузки (независящим от изменения тока). Следовательно, режим разряда будет более колебательным и, как показали проведенные исследования, увеличение емкости конденсатора приведет к большему уменьшению длительности импульсного тока в нагрузке и большему увеличению средней скорости его нарастания.

Кроме того, характерное повышение величины сопротивления нагрузки к окончанию разрядного импульса будет существенно уменьшать динамические потери в запираемых полупроводниковых ключах, поскольку при той же величине разрядного тока падение напряжения на сопротивлении нагрузки будет увеличиваться, а следовательно, в ней будет рассеиваться и большая мощность.

2. Особенности изменения импульсной мощности в искроэрозионной нагрузке при разрядах конденсатора. Анализ режимов установок ОЭИД металлов в жидкости пока-

зывает, что с увеличением импульсной мощности, выделяемой в электроискровой нагрузке, максимальные размеры получаемых электроэрозионных порошков уменьшаются [1, 3–8, 10–12].

На рис. 4 показана многоконтурная схема тиристорного формирователя разрядных импульсов (ФРИ) установок ОЭИД, в котором могут быть реализованы положительная и отрицательная обратные связи между напряжением заряда накопительного конденсатора C и

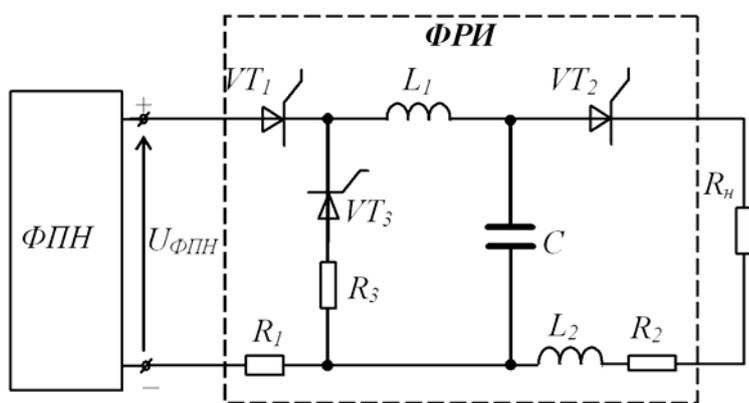


Рис. 4

остаточным напряжением предыдущего его разряда.

Предварительный анализ показал, что для повышения средней импульсной мощности в нагрузке в ФРИ целесообразно реализовывать положительную обратную связь (ПОС), а для уменьшения неустойчивости параметров разрядных импульсов – отрицательную (ООС).

Реализация обратной связи величины зарядного напряжения конденсатора с величиной остаточного

напряжения при его предыдущем разряде изменяет сопротивление электроискровой нагрузки при последующем его разряде [4]. Поэтому регулирование обратной связи по напряжению в электрических цепях ФРИ можно применять для повышения напряжения заряда конденсатора и увеличения разрядных токов в нагрузке при стохастическом увеличении ее сопротивления. Изменением величины начального напряжения на конденсаторе можно регулировать как напряжение его заряда, так и энергетические характеристики электрических цепей ФРИ, в частности их КПД, среднюю импульсную мощность в нагрузке и коэффициент использования энергии конденсатора.

Использование ПОС величины напряжения заряда конденсатора от величины остаточного напряжения при его предыдущем разряде уменьшает электроискровое сопротивление нагрузки при последующем разряде конденсатора [1, 4, 6]. Такая зависимость применяется для повышения напряжения заряда конденсатора и увеличения разрядных токов в нагрузке при увеличении ее сопротивления.

В схеме на рис. 4 можно реализовать нерегулируемую ПОС, если исключить тиристор VT_3 . Конденсатор в такой схеме заряжается от формирователя постоянного напряжения (ФПН) по контуру ФПН - R_1 - VT_1 - L_1 - C - ФПН и разряжается по контуру C - VT_2 - R_n - R_2 - L_2 - C (где R_n , R_1 , R_2 – активные сопротивления соответственно нагрузки, зарядной и разрядной цепей ФРИ).

При анализе переходных процессов принималось допущение, что в течение длительности одного разрядного импульса активное электрическое сопротивление нагрузки R_n являлось постоянным, но могло изменяться во время паузы между разрядными импульсами. Такое допущение позволяло оценивать энергетические параметры и эффективность параметрической обратной связи в цепях ФРИ при изменении величины R_n случайным образом.

Если в схеме на рис. 4 поочередно включать тиристорные коммутаторы VT_1 и VT_2 , то после первого же колебательного разряда конденсатора на электроискровую нагрузку R_n его последующий колебательный заряд будет осуществляться при начальном отрицательном на нем напряжении (по отношению к напряжению на выходе ФПН). При таких условиях заряд конденсатора может происходить до напряжений $U_{C_{\max}} \gg 2 U_{\text{ФПН}}$ (где $U_{\text{ФПН}}$ – напряжение на выходе ФПН) [4, 7]. На основании экспериментальных исследований обосновано, что для получения субмикронных и наноразмерных порошков целесообразно выбирать такие параметры цепей ФРИ, при которых активное сопротивление нагрузки R_n может изменяться в диапазоне 0,012...0,363 Ом, а добротность разрядной цепи $Q_2 = 0,6...7$.

С учетом ограничения напряжения на тиристорных коммутаторах, которые не должны превышать 2 кВ, и минимизации потерь энергии во всех элементах разрядного контура

было определено, что в двухконтурных схемах ФРИ допустимы следующие параметры: емкость накопительного конденсатора $C \approx 10^{-4}$ Ф, напряжение ФПН $U_{\text{ФПН}} \approx 500$ В, индуктивность цепи заряда конденсатора $L_1 \approx 10^{-4}$ Гн и ее добротность $Q_1 \geq 20$, а индуктивность и активное сопротивление цепи разряда конденсатора $L_2 \approx 5 \cdot 10^{-6}$ Гн и $R_2 \approx 0,02$ Ом [7]. Моделирование переходных процессов в схеме, приведенной на рис. 4 при отключенном тиристоре VT_3 и нулевом начальном напряжении на конденсаторе, проводилось с применением пакета программ MATLAB/SIMULINK.

Были определены зависимости напряжения заряда конденсатора $U_{C\text{max}}$ и средней импульсной мощности в нагрузке $P_{\text{ср н}} = W_{\text{н}}/\tau_{\text{разр}}$ от добротности разрядной цепи Q_2 . Также исследовался характер изменения коэффициента использования конденсатора $k_{\text{исп С}} = (W_{\text{н}} + W_{R_2})/W_{C\text{max}}$ и КПД разрядной цепи $\eta_2 = W_{\text{н}}/(W_{\text{н}} + W_{R_2})$ (где W_{R_2} – энергия, выделенная на ее активном сопротивлении R_2 ; $W_{C\text{max}}$ – максимальная энергия, накопленная в конденсаторе на момент его разряда) при изменении добротности Q_2 от 0,6 до 7. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры Q_2	$U_{C\text{max}}$, В	$W_{\text{н}}$, Дж	$\tau_{\text{разр}}$, 10^{-6} с	$P_{\text{ср н}} 10^3$, Дж/с	$W_{C\text{max}}$, Дж	$k_{\text{исп С}}$, %	η_2 , %
$Q_2 = 0,6$ ($R_{\text{н}} = 0,363$ Ом)	974	44,9	138,5	324	47,5	99,7	94,8
$Q_2 = 1,5$ ($R_{\text{н}} = 0,129$ Ом)	1397	75,1	74,7	1005	97,5	89,0	86,6
$Q_2 = 2,5$ ($R_{\text{н}} = 0,069$ Ом)	1903	100,7	71,8	1402	180,5	72,4	77,1
$Q_2 = 3,5$ ($R_{\text{н}} = 0,044$ Ом)	2339	111,7	71,1	1572	272,9	59,6	68,7
$Q_2 = 5$ ($R_{\text{н}} = 0,035$ Ом)	2565	112,7	70,9	1590	328,1	54,0	63,6
$Q_2 = 5,5$ ($R_{\text{н}} = 0,0207$ Ом)	3100	102,4	70,8	1446	478,9	42,0	50,9
$Q_2 = 7$ ($R_{\text{н}} = 0,012$ Ом)	3528	74,3	70,6	1052	588,8	33,6	37,5

На рис. 5 представлены зависимости от добротности разрядного контура Q_2 параметров цепей ФРИ, использующего положительную обратную связь величины напряжения заряда конденсатора от величины остаточного напряжения при его предыдущем разряде: а – $U_{C\text{max}}$ и $P_{\text{ср н}}$, б – $k_{\text{исп С}}$ и η_2 .

Исследования [7] показали, что увеличение добротности разрядного контура приводит к росту напряжения заряда конденсатора $U_{C\text{max}}$. При этом средняя импульсная мощность в нагрузке $P_{\text{ср н}}$ с ростом добротности Q_2 от 0,6 до 5 сначала увеличивается до своего максимального значения (которое в 4,9 раза больше, чем начальное значение $P_{\text{ср н}}$ при $Q_2 = 0,6$), а затем уменьшается по мере дальнейшего возрастания добротности (начиная со значений $Q_2 \approx 5$). При $Q_2 \approx 7$ средняя импульсная мощность в нагрузке $P_{\text{ср н}}$ уменьшится приблизительно в 1,5 раза по сравнению

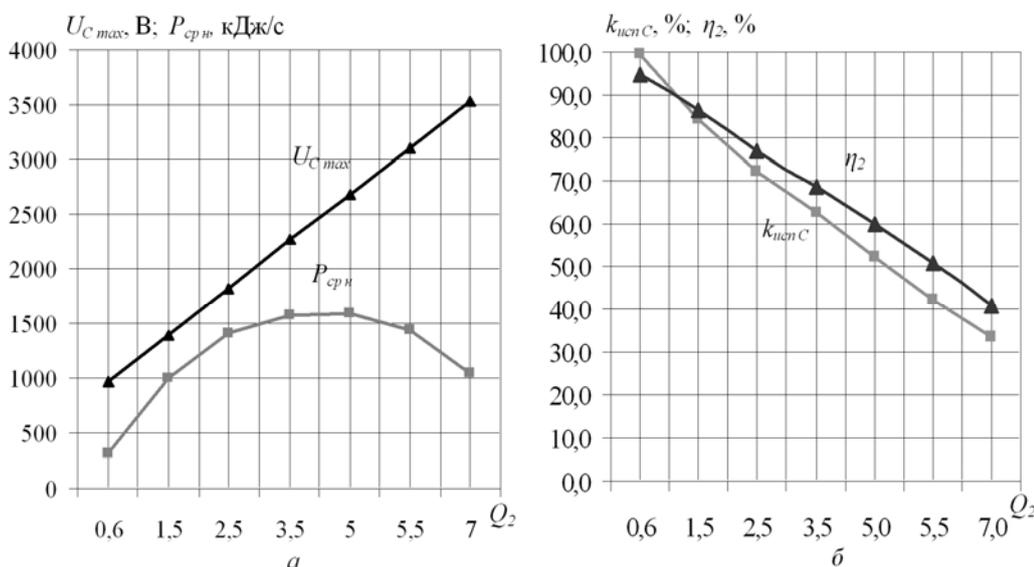


Рис. 5

с ее значением при $Q_2 \approx 5$. В то же время при увеличении значений Q_2 от 0,6 до 7 величина максимального напряжения заряда конденсатора $U_{C \max}$ монотонно увеличивается (приблизительно в 3,6 раза). Указанные зависимости объяснимы, поскольку с увеличением Q_2 от 0,6 до 7 КПД разрядного контура η_2 снижается в 2,5 раза, а коэффициент использования энергии конденсатора $k_{исп\ C}$ – в 3 раза.

Таким образом, наиболее оптимальным является изменение добротности Q_2 от 1,5 до 2,5. При этом напряжение заряда конденсатора $U_{C \max}$ ограничено значениями 1,5 – 3,2 $U_{ФПН}$, а импульсная мощность в нагрузке $P_{ср\ н}$ увеличивается приблизительно в 3 раза (по сравнению с режимами без обратной связи) при достаточно высоких КПД разрядной цепи $\eta_2 \approx 77\text{--}87\%$ и коэффициенте использования энергии конденсатора $k_{исп\ C} \approx 75\text{--}89\%$.

Работа ФРИ в таком (двухконтурном) режиме показывает широкие возможности повышения импульсной мощности в нагрузке. В то же время такой режим реализует нерегулируемую ПОС по напряжению, главным недостатком которой является необходимость увеличения потерь энергии в контурах схемы для уменьшения нестабильности напряжения заряда конденсатора $U_{C \max}$ и напряжения на тиристорных коммутаторах при значительном уменьшении активного сопротивления нагрузки R_n .

Указанный недостаток может быть устранен при работе ФРИ в трехконтурном режиме, реализующем регулируемые отрицательную и положительную обратные связи по напряжению. В этом режиме после заряда и последующего разряда конденсатора включается контур его дополнительного обратного перезаряда $C - R_3 - VT_3 - L_1 - C$ до некоторого положительного напряжения U_{0C} .

Если электрическое сопротивление нагрузки R_n уменьшится, то величина напряжения U_{0C} увеличится, что приведет к уменьшению напряжения на конденсаторе при его последующем заряде. Снижение напряжения заряда конденсатора повлечет увеличение активного сопротивления нагрузки и снижение остаточного напряжения на конденсаторе при его последующем разряде. Аналогично при увеличении сопротивления нагрузки R_n напряжение U_{0C} уменьшится, а величина напряжения последующего заряда конденсатора увеличится, что вызовет уменьшение активного сопротивления нагрузки и увеличение остаточного напряжения на конденсаторе при его последующем разряде.

Принималось, что тиристорные коммутаторы VT_1 , VT_2 и VT_3 в схеме на рис. 4 включались поочередно. Для выбора оптимальных алгоритмов включения тиристорных коммутаторов $VT_1 - VT_3$ и параметров элементов цепей ФРИ проводился анализ возникающих в них переходных процессов при допущении, что в течение длительности разряда конденсатора на нагрузку ее активное сопротивление $R_n = \text{const}$, но оно могло изменяться во время паузы между разрядами. Переходные процессы рассчитывались при тех же параметрах цепей заряда и разряда, а сопротивление цепи обратного перезаряда принималось равным сопротивлению зарядной цепи $R_3 = R_1 = 0,033$ Ом. Очевидно, что момент включения перезарядного тиристора VT_3 (Δt_{VT_3}) влияет на начальные условия по напряжению и току переходных процессов

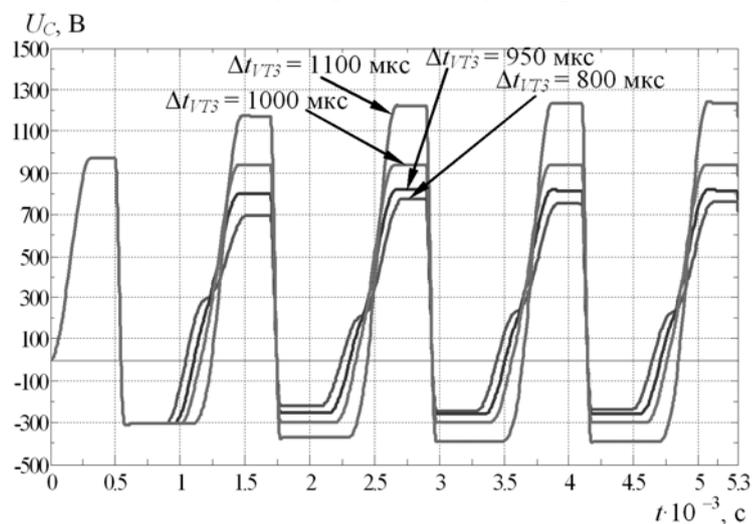


Рис. 6

в зарядном контуре конденсатора при неизменных параметрах элементов схемы.

На рис. 6 представлены осциллограммы напряжения на конденсаторе при добротности разрядной цепи $Q_2 = 1,5$ (соответственно при $R_n = 0,13$ Ом). Период управляющих сигналов для всех тиристорных (VT_1 , VT_2 и VT_3) задавался 1200 мкс, а момент включения VT_3 изменялся от 800 до 1100 мкс [7].

Из этого рисунка видно, что чем позже включается тиристор VT_3 в цепи обратного перезаряда конденсатора (при неизменных параметрах всех цепей схемы), тем до большего напряжения заряжается конденсатор. Таким образом, изменением времени задержки включения VT_3 можно увеличить зарядное напряжение конденсатора в 1,08...1,6 раза. Требуемая глубина регулирования напряжения будет определяться значением этой задержки.

Таблица 4

	$\Delta t_{VT3},$ 10^{-3} с	$U_{Cзар},$ В	$P_{ср н},$ 10^3 Дж / с	$k_{исп С},$ %,	$\eta_2,$ %
$Q_2 = 0,6$ ($R_H = 0,363 \text{ Ом}$)	0,8	968	316,9	99,7	94,8
	0,95	968	317,1	99,7	94,8
	1	969	317,1	99,6	94,77
	1,1	971	319,2	99,7	94,8
$Q_2 = 1,5$ ($R_H = 0,129 \text{ Ом}$)	0,8	755	293,8	89,0	86,6
	0,95	815	341,8	89,1	86,6
	1	935	450,6	89,1	86,6
	1,1	1236	792,2	89,2	86,6
$Q_2 = 2,5$ ($R_H = 0,069 \text{ Ом}$)	0,8	666	172,9	71,8	77,5
	0,95	781	236,2	72,0	77,5
	1	1016	399,3	72,0	77,5
	1,1	1604	991,0	72,4	77,5
$Q_2 = 3,5$ ($R_H = 0,044 \text{ Ом}$)	0,8	628	113,5	60,2	69,1
	0,95	788	178,6	59,6	68,8
	1	1117	35,9	59,6	68,7
	1,1	1928	1054,4	59,1	68,5
$Q_2 = 5$ ($R_H = 0,035 \text{ Ом}$)	0,8	610	90,3	54,0	63,69
	0,95	799	154,3	54,0	63,6
	1	1179	335,1	53,9	63,6
	1,1	2113	1044,0	53,3	63,1
$Q_2 = 5,5$ ($R_H = 0,021 \text{ Ом}$)	0,8	594	52,1	41,1	50,9
	0,95	834	108,6	43,5	50,9
	1	1326	271,4	43,2	50,9
	1,1	2468	917,1	41,9	50,9
$Q_2 = 7$ ($R_H = 0,012 \text{ Ом}$)	0,8	581	30,1	33,8	37,4
	0,95	874	73,3	36,3	37,5
	1	1453	198,9	35,6	37,5
	1,1	2775	697,0	34,1	37,5

С увеличением добротности Q_2 диапазон регулирования напряжения заряда конденсатора $U_{Cзар}$ от минимального $U_{C \min}$ до максимального $U_{C \max}$ значения расширяется – при $Q_2 \approx 7$ он в 4,56 раза шире, чем при $Q_2 \approx 1,5$.

На рис. 8 представлены зависимости средней импульсной мощности в нагрузке $P_{ср н}$ (рис. 8 а), КПД разрядной цепи η_2 и коэффициента использования энергии конденсатора $k_{исп С}$ (рис. 8 б, в) от Δt_{VT3} при изменении добротности разрядной цепи Q_2 от 0,6 до 7.

Анализ энергетических параметров, приведенных в табл. 4 и на рис. 8, показывает, что значения $k_{исп С}$ и η_2 уменьшаются при увеличении добротности разрядной цепи Q_2 и практически не зависят от длительности паузы Δt_{VT3} между включениями тиристоров VT_3 и VT_1 .

Кроме этого, из рис. 8 видно, что увеличение длительности паузы Δt_{VT3} для всех значений $Q_2 \geq 1,5$ вызывает монотонное возрастание средней импульсной мощности $P_{ср н}$ в нагрузке. При этом необходимо учитывать, что значения $P_{ср н}$, соответствующие одним и тем же значениям Δt_{VT3} , возрастают при увеличении добротности разрядной цепи Q_2 в диапазоне от 0,6 до 5. При $Q_2 > 5$ они начинают уменьшаться (при сохранении общего монотонного возрастания $P_{ср н}$).

Кроме этого, были исследованы зависимости от величины задержки включения тиристора VT_3 в цепи обратного перезаряда конденсатора Δt_{VT3} следующих энергетических параметров цепей: средней импульсной мощности в нагрузке $P_{ср н}$, коэффициента использования конденсатора $k_{исп С}$ и КПД разрядной цепи η_2 при добротностях разрядного контура Q_2 от 0,6 до 7 [7].

Результаты анализа этих зависимостей приведены в табл. 4, а на рис. 7 показаны диапазоны изменения максимального ($U_{Cзар \max}$) и минимального ($U_{Cзар \min}$) напряжения заряда конденсатора при изменении добротности разрядной цепи Q_2 от 0,6 до 7. Анализ их показывает, что диапазон изменения напряжения заряда конденсатора $U_{Cзар}$ зависит не только от времени включения тиристора обратного перезаряда конденсатора VT_3 , но и от добротности разрядной цепи Q_2 . Установлено, что при неизменных параметрах элементов схемы увеличение временной паузы Δt_{VT3} от 800 до 1100 мкс может в 1,1...4,8 раза увеличить напряжение последующего заряда конденсатора. Максимальные напряжения заряда конденсатора соответствуют наименьшей величине $\Delta t_{VT3} = 800$ мкс, а минимальные – наибольшей $\Delta t_{VT3} = 1100$ мкс.

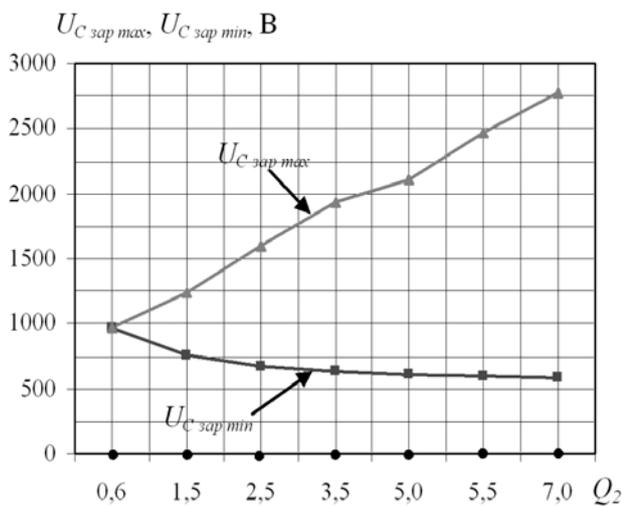


Рис. 7

Таким образом, изменением длительности паузы Δt_{VT3} можно регулировать не только величину напряжения заряда конденсатора и накапливаемую в нем энергию, но и среднюю мощность, выделяемую в активном сопротивлении нагрузки.

Установлено, что в трехконтурном тиристорном ФРИ с регулируемой обратной связью по напряжению добротность разрядной цепи Q_2 целесообразно изменять от 1,5 до 2,5, что позволяет регулировать напряжение заряда конденсатора $U_{Cзар}$ от $1,5 U_{ФПН}$ до $3,2 U_{ФПН}$, увеличивать в 3 раза среднюю импульсную мощность в нагрузке $P_{срн}$ при КПД разрядной цепи $\eta_2 \approx 77 - 87\%$ и $k_{испC} \approx 75-89\%$.

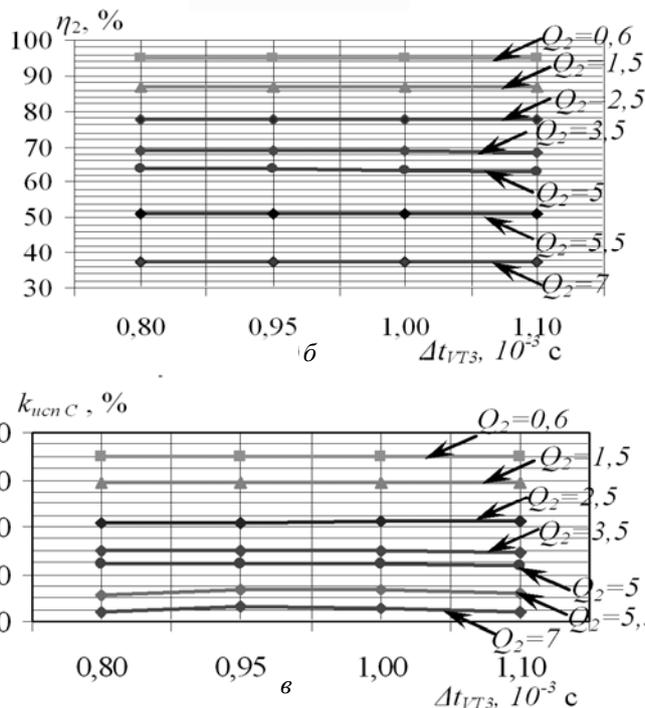
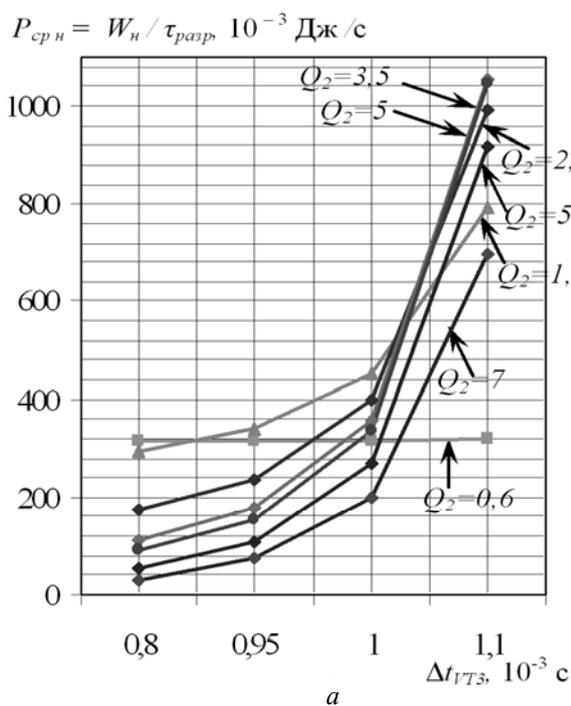


Рис. 8

Следует отметить, что при стохастическом уменьшении сопротивления нагрузки R_n (при изменении Q_2 от 0,6 до 7) и соответственно повышении напряжения $U_{C\max}$ до значений, недопустимых для современных тиристорных коммутаторов, регулируемая обратная связь за счет изменения паузы Δt_{VT3} позволяет снизить это напряжение до приемлемого уровня.

Выводы. 1. Увеличение емкости разряжаемых конденсаторов с принудительным прерыванием разрядного тока при достижении им заданного фиксированного значения $I_{фикс}$ является эффективным методом уменьшения длительности импульсного тока $t_{фикс}$ и увеличения средней скорости его нарастания $I_{фикс}/t_{фикс}$. Причем увеличение величины фиксированного значения тока $I_{фикс}$ вызывает монотонное уменьшение времени $t_{фикс}$ и увеличение скорости нарастания тока $I_{фикс}/t_{фикс}$, что позволяет расширить диапазон регулирования динамических параметров импульсных токов в нагрузке.

2. Эффективность метода уменьшения длительности разрядного тока и увеличения средней скорости его нарастания за счет увеличения емкости разряжаемых конденсаторов и принудительного прерывания тока при достижении им фиксированного значения $I_{фикс}$ возрастает в электроразрядных установках, электрическое сопротивление нагрузки которых нелинейно уменьшается при нарастании разрядного тока. В частности, применение такого метода

в установках объемного электроискрового диспергирования металлов в жидкостях позволяет уменьшать максимальные размеры получаемых электроэрозионных частиц.

3. Поскольку при увеличении емкости C разряжаемого конденсатора максимальный ток его разряда I_{\max} асимптотически стремится к постоянной величине U_{0C}/R_n (где U_{0C} – напряжение зарядки конденсатора, R_n – сопротивление нагрузки), то для каждого фиксированного значения тока $I_{\text{фикс}}$ существует свое критическое значение емкости $C_{\text{кр}}$, при превышении которой применение предложенного метода становится нецелесообразным.

4. Для повышения средней импульсной мощности в нагрузке в электрических цепях полупроводниковых формирователей разрядных импульсов целесообразно реализовывать положительную обратную связь напряжения заряда конденсатора с величиной остаточного на нем напряжения при предыдущем разряде. Для уменьшения нестабильности параметров разрядных импульсов целесообразнее использовать отрицательную обратную связь указанных параметров.

5. На основании проведенных исследований установлены закономерности влияния начальных условий колебательного заряда конденсатора и добротности его разрядной цепи на изменение энергетических характеристик электроразрядных установок (импульсной мощности, выделяемой в электроискровой нагрузке, коэффициента использования конденсатора и КПД разрядной цепи), а также определены диапазоны энергоэффективного регулирования таких характеристик.

6. Наличие трех электрических цепей (заряда, разряда и обратного перезаряда накопительного конденсатора) в схеме полупроводникового формирователя разрядных импульсов обеспечивает реализацию в ней регулируемых отрицательной и положительной обратных связей по напряжению. Показано, что чем позже включается тиристорный коммутатор в цепи обратного перезаряда конденсатора при добротности разрядного контура $Q_2 \geq 1,5$, тем больше возрастает средняя импульсная мощность в нагрузке.

Установлено, что в электрических цепях тиристорного формирователя разрядных импульсов (с регулируемой и нерегулируемой обратными связями по напряжению) добротность разрядной цепи Q_2 целесообразно изменять от 1,5 до 2,5, что позволяет регулировать напряжение заряда конденсатора $U_{\text{Сзар}}$ от $1,5 U_{\text{ФПН}}$ до $3,2 U_{\text{ФПН}}$, увеличивая при этом в 3 раза среднюю импульсную мощность в нагрузке при КПД разрядной цепи более 77 %.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология химических соединений и порошков металлов (гл. 2 и 3). – Фрунзе: Илим, 1990. – 255 с.
2. Белый И.В., Фертник С.М., Хищенко П.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища шк., 1977. – 168 с.
3. Супруновская Н.И. Метод формирования мощных разрядных импульсов с повышенной скоростью нарастания токов в нагрузке // Техн. электродинамика. – 2012. – № 2. – С. 109–110.
4. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. – К.: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.
5. Щерба А.А., Иванов А.В. Высоковольтный электротехнический комплекс для электроразрядной обработки расплавов металлов с повышенной интенсивностью электросилового воздействия и перемешивания // Электронная обработка металлов. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 108–116.
6. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. электродинамика. – 2012. – № 5. – С. 3–9.
7. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. электродинамика. – 2014. – № 1. – С. 3–12.
8. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Синицын В.К., Иващенко Д.С. Аперiodические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности токов в нагрузке // Техн. электродинамика. – 2012. – № 3. – С. 9–10.
9. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // J. of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – Vol. 254-255. – P. 1–6.
10. Berkowitz A.E., Walter J.L. Sparc Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine powders // J. of Mater. Res. – March/April, 1987. – № 2 (2). – P. 277–288.
11. Cabanillas E.D., Lopez M., Pasqualini E.E., Cirilo Lombardo D.J. Production of uranium-molybdenum particles by spark-erosion // J. of Nuclear Materials. – 2004. – № 324. – P. 1–5.

12. Casanueva R., Azcondo F.J, Branas C., Bracho S. Analysis, design and experimental results of a high-frequency power supply for spark erosion // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – Vol. 20. – P. 361–369.

УДК 621.3.011:621.311

А.А. Щерба, чл.-кор. НАН України, **Н.І. Супруновська**, канд. техн. наук, **С.С. Розіскулов**, асп., **О.О. Білецький**, асп.
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Метод регулювання й стабілізації динамічних параметрів розрядних струмів накопичувальних конденсаторів

Досліджено особливості зміни середньої швидкості наростання струму в розрядному контурі накопичувально-го конденсатора й імпульсної потужності в іскроерозійному навантаженні при формуванні в ньому розрядних імпульсів з додатним й від'ємним зворотними зв'язками за напругою. Розроблено метод підвищення швидкості наростання струму й імпульсної потужності в навантаженні за рахунок збільшення ємності розряджуваного конденсатора і примусового обмеження тривалості розрядного струму. Результати отримані відповідно до планів фундаментальної НДР "ІМРОЗ". Бібл. 12, рис. 8, табл. 4.

Ключові слова: конденсатор, розряд, електроіскрове навантаження, зміна струму, імпульсна потужність.

A.A. Shcherba, N.I. Suprunovska, S.S. Roziskulov, O.A. Beletsky

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Method of regulating and stabilization of dynamic parameters of discharge currents of reservoir capacitors

Features of change of average rate of currents rise in a discharge circuit of the reservoir capacitor and pulse power in spark-erosive load at formation in it of discharge pulses with positive and negative back-coupling on voltage are studied. The method for increasing of rate of currents rise and pulse power in load at the expense of increase in capacity of the discharged capacitor and forced limitation of duration of a discharge current is developed. Results were obtained in accordance with the plans of fundamental research "Imroz". References 12, figures 8, tables 4.

Key words: capacitor, discharge, electro-spark load, change of current, pulse power.

Надійшла 6.05.2014
Received 6.05.2014