

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ НАГРУЗКИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ СИСТЕМЫ

Визначено коефіцієнти корисної дії (ККД) зарядного й розрядного кіл конденсатора електророзрядної системи, а також її сумарний ККД при багаторазовому коливальному заряді конденсатора від формувача постійної напруги (ФПН) з наступним його коливальним розрядом на лінійне навантаження. Проведено аналіз залежності цих ККД від зміни величини опору навантаження в широкому діапазоні, внаслідок чого перезарядна від'ємна напруга на конденсаторі досягала по абсолютній величині від 10 до 80 % напруги ФПН. Визначені енергетично найбільш доцільні зарядно-розрядні режими конденсатора. Показано, що збільшення (за модулем) від'ємної початкової напруги на конденсаторі при незмінній добротності зарядного кола, призводить, з одного боку, до зменшення ККД заряду, а з іншого – до підвищення напруги заряду конденсатора.

Для реализации в электротехнологических установках больших импульсных токов и мощностей эффективным является использование емкостных накопителей электрической энергии (батарей конденсаторов) [1–8]. Накопительные конденсаторы применяются и в системах электроискрового диспергирования металлов в жидкости [3, 5–8]. В таких системах обычно реализуют колебательный заряд накопительного конденсатора от формирователя постоянного напряжения (ФПН) и его колебательный разряд на электроискровую нагрузку, представляющую собой слой металлических гранул, погруженных в токопроводящую жидкость между электродами [1, 7, 8]. Электрическая схема формирователя разрядных импульсов в такой системе представлена на рис. 1.

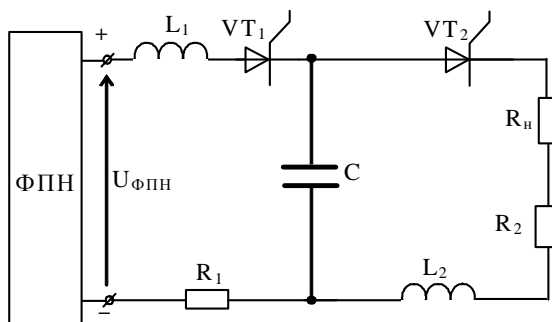


Рис. 1

В приведенной схеме колебательный заряд конденсатора емкостью C осуществляется от ФПН напряжением $U_{ФПН}$ через дроссель индуктивностью L_1 и резистор сопротивлением R_1 (обычно это суммарное активное сопротивление ФПН, дросселя, проводов цепи и конденсатора) после отпирания зарядного тиристора VT_1 . Колебательный разряд конденсатора осуществляется на сопротивление электроискровой нагрузки R_n , через сопротивление R_2 (сопротивление разрядной цепи) и индуктивность L_2 (индуктивность разрядной цепи, которая обычно составляет

1...5 мкГн) после включения разрядного тиристора VT_2 . Использование колебательных процессов заряда и разряда конденсатора позволяет осуществлять быстрое естественное запираание тиристорных ключей VT_1 и VT_2 и реализовать в нагрузке достаточно высокую частоту разрядных импульсов тока (обычно более 1 кГц).

При реализации в контуре нагрузки добротности $Q_2 > 0,5$ в нем возможно осуществлять разряд конденсатора на нагрузку с его перезарядом до напряжения $U_C(t = \tau_{имп}) < 0$ (где $\tau_{имп}$ – длительность разрядного импульса, которая обычно составляет 20...120 мкс) [1, 7, 8].

Если в схеме, показанной на рис. 1, имеют место только колебательные заряд и разряд конденсатора посредством поочередного включения тиристорных ключей VT_1 и VT_2 , то во всех зарядных циклах, начиная со второго, колебательный заряд будет осуществляться при начальном отрицательном напряжении на конденсаторе (по отношению к напряжению на выходе ФПН).

В работах [1, 6–11] показано, что при отрицательном остаточном напряжении на конденсаторе после его разряда на нагрузку в следующем зарядном цикле напряжение на нем повышается. Кроме того, сопротивление электроискровой нагрузки обычно уменьшается при

увеличении напряжения заряда конденсатора. Таким образом, между зарядным и перезарядным напряжениями конденсатора реализуется положительная обратная связь.

Для выбора энергоэффективных режимов работы такой электроразрядной системы необходимо провести исследование энергетических характеристик (в первую очередь КПД) ее зарядной и разрядной цепей, а также КПД всей системы в целом.

Целью данной работы являлись анализ зависимости КПД электроразрядной системы от диапазона изменения величины сопротивления нагрузки и определение энергетически наиболее целесообразных зарядно-разрядных режимов конденсатора такой установки.

При анализе переходных процессов в цепях принималось, что коммутация тиристорных ключей происходила мгновенно, при этом в закрытом состоянии их сопротивление равнялось бесконечности и соответственно ток и рассеяние мощности равнялись нулю, а в открытом состоянии их сопротивление и соответственно падение напряжения и рассеяние мощности равнялись нулю.

КПД зарядной цепи при колебательном заряде конденсатора от ФПН определяется по формуле [5, 9]

$$\eta_z = \frac{W_C}{W_{\text{ФПН}}} = \frac{\left[I + \beta \cdot e^{\frac{-\pi}{2Q_1}} \right]^2 - (I - \beta)^2}{2 \cdot \beta \cdot \left(1 + e^{\frac{-\pi}{2Q_1}} \right)}, \quad (1)$$

где W_C – доза энергии, поступающая в конденсатор; $W_{\text{ФПН}}$ – доза энергии, отбираемая от

ФПН за время заряда конденсатора; $\beta = 1 - \frac{U_{0C3}}{U_{\text{ФПН}}}$; U_{0C3} – начальное напряжение на кон-

денсаторе при его очередном заряде, которое определяется минимальным (так как оно отрицательно) напряжением, до которого разряжается конденсатор в предыдущем цикле;

$Q_1 = \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{C \cdot R_1}}$ – добротность зарядной цепи.

Выражение для КПД разрядной цепи при колебательном разряде конденсатора на линейную нагрузку имеет вид

$$\eta_p = \frac{W_n}{W_n + W_2} = \frac{\int_0^{\tau_{\text{умн}}} R_n \cdot i_p^2(t) dt}{\int_0^{\tau_{\text{умн}}} (R_n + R_2) \cdot i_p^2(t) dt} = \frac{R_n}{R_n + R_2}, \quad (2)$$

где W_n – энергия, рассеиваемая в нагрузке; W_2 – энергия, рассеиваемая в активных элементах разрядного контура (на сопротивлении R_2); $i_p(t)$ – ток в разрядной цепи.

Для КПД всей системы можно записать

$$\eta_{\text{сист}} = \eta_z \cdot \eta_p. \quad (3)$$

Как уже было отмечено, между зарядным и перезарядным напряжениями конденсатора реализуется положительная обратная связь, то есть увеличение абсолютной величины начального отрицательного напряжения на конденсаторе приводит к повышению напряжения его заряда, что в свою очередь влечет еще большее увеличение по модулю отрицательного напряжения на конденсаторе после его разряда. Таким образом, с каждым последующим циклом конденсатор будет заряжаться до все большего напряжения. Однако проведенные исследования показали, что величина прироста напряжения заряда конденсатора с каждым циклом убывает и стремится к нулю. Следовательно, после достаточно большого количества зарядно-разрядных циклов можно утверждать, что произошла их стабилизация с определен-

ной точностью, подразумевая, что различие между условиями каждого следующего зарядно-разрядного цикла пренебрежимо мало.

Граничное напряжение перезаряда, соответствующее стабилизированному (с определенной сколь угодно большой степенью точности) начальному напряжению на конденсаторе при его заряде $U_{0Cз}$, определяется выражением [9, 11]

$$U_{0Cз} = - \frac{U_{ФПН} \cdot \left(1 + e^{\frac{-\pi}{2Q_1 \cdot A_1}} \right)}{\left(1 - e^{\frac{-\pi}{2} \left(\frac{1}{Q_1 A_1} + \frac{1}{Q_2 A_2} \right)} \right)} \cdot e^{\frac{-\pi}{2Q_2 \cdot A_2}}, \quad (4)$$

где $Q_2 = \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{C \cdot (R_n + R_2)}}$ – добротность разрядной цепи; $A_1 = \sqrt{1 - \frac{I}{4Q_1^2}}$; $A_2 = \sqrt{1 - \frac{I}{4Q_2^2}}$.

Аналогично граничное напряжение заряда конденсатора, соответствующее начальному напряжению, при котором начинается его разряд, можно рассчитать согласно формуле [10, 11]

$$U_{0Cр} = \frac{U_{ФПН} \cdot \left(1 + e^{\frac{-\pi}{2Q_1 \cdot A_1}} \right)}{\left(1 - e^{\frac{-\pi}{2} \left(\frac{1}{Q_1 A_1} + \frac{1}{Q_2 A_2} \right)} \right)}. \quad (5)$$

Для проведения исследований с целью определения энергоэффективных режимов работы рассматриваемой системы были выбраны такие параметры зарядной и разрядной цепей конденсатора, при которых реализуется его колебательный заряд и разряд, а диапазон изменений сопротивления нагрузки соответствует реальным значениям, полученным в ходе многочисленных экспериментальных исследований.

Емкость накопительного конденсатора была выбрана равной $C = 10^{-4}$ Ф, напряжение ФПН составляло $U_{ФПН} = 500$ В.

Индуктивность дросселя в зарядной цепи равнялась $L_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ Гн и была неизменной в процессе работы. При этом общее активное сопротивление зарядной цепи равнялось $R_1 = 0,0075$ Ом, а добротность зарядной цепи составляла $Q_1 = 20$.

Разрядная цепь электроимпульсной системы выполнена таким образом, что ее индуктивность равнялась $L_2 = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн, а активное сопротивление составляло $R_2 = 0,005$ Ом. При этом эквивалентное сопротивление R_n электроискровой нагрузки изменялось от 0,02 до 0,1 Ом, что вызывало изменение добротности разрядной цепи Q_2 от 0,7 до 1,4.

Анализ режимов в цепях электроразрядной системы проводился с использованием программного пакета MathCAD 12.

На рис. 2 представлены зависимости начального напряжения на конденсаторе при его заряде ($U_{0Cз}$) и разряде ($U_{0Cр}$) (рис. 2 а), КПД зарядной и разрядной цепи конденсатора и КПД всей установки (рис. 2 б) от сопротивления нагрузки R_n .

В таблице приведены значения КПД зарядной и разрядной цепей конденсатора, а также КПД всей системы при изменении сопротивления нагрузки R_n от 0,09 до 0,0206 Ом. При этом добротность разрядного контура Q_2 изменялась от 0,725 до 1,398, начальное напряжение на конденсаторе при его заряде $U_{0Cз}$ – от $-50,8$ до $-399,6$ В, а начальное напряжение на конденсаторе при его разряде $U_{0Cр}$ – от 1009 до 1332 В.

Из зависимостей рис. 2 и данных таблицы видно, что с уменьшением сопротивления нагрузки в исследуемом диапазоне (и соответственно с увеличением добротности разрядной цепи) конденсатор перезаряжается до все большего (по модулю) значения, а его зарядное напряжение растет до все большей величины, которая может превышать напряжение ФПН в 2,6 раза и более.

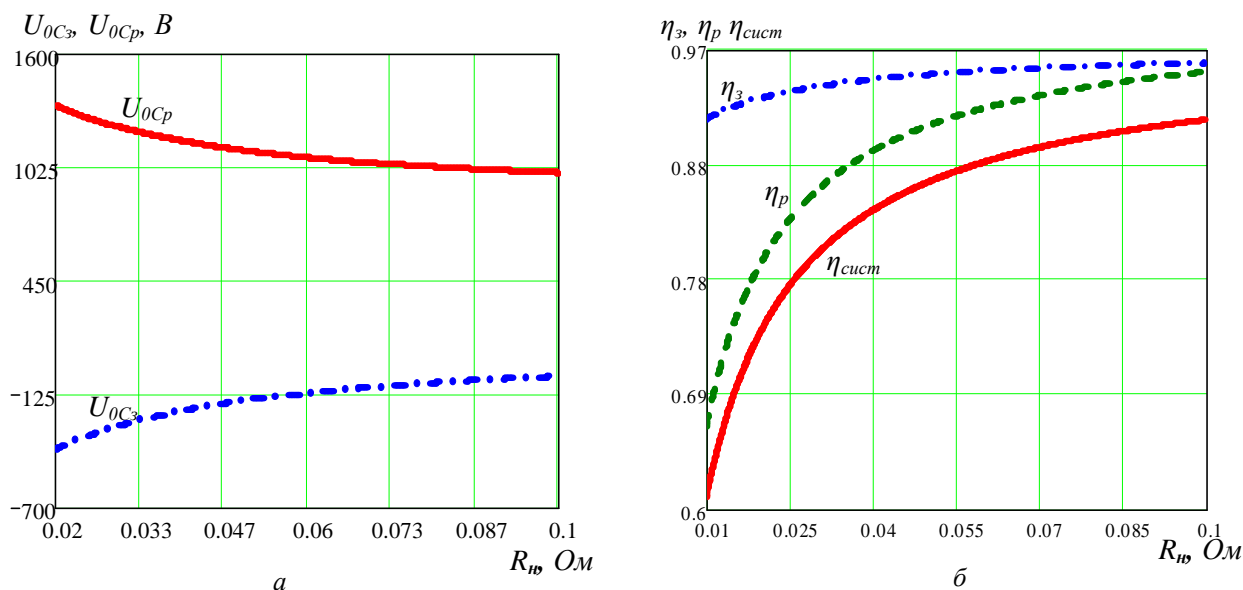


Рис. 2

$R_n, \text{ Ом}$	0,09	0,0525	0,0289	0,0206
Q_2	0,725	0,933	1,214	1,398
$U_{0Cз}, \text{ В}$	-50,8	-149,6	-299,8	-399,6
1009	1101		1239	1332
η_z	0,958	0,951	0,94	0,932
η_p	0,947	0,913	0,853	0,805
$\eta_{\text{сист}}$	0,908	0,868	0,801	0,75

При этом при уменьшении R_n в 4,4 раза (крайние значения исследуемого диапазона изменения), а соответственно увеличении Q_2 в 1,93 раза, КПД зарядной и разрядной цепей конденсатора снижаются соответственно на 3 и 18 %, а КПД всей установки – на 32 %.

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что при R_n , соответствующем перезарядному напряжению конденсатора 10...30 % от $U_{\text{ФПН}}$ (по модулю), КПД зарядной и разрядной цепей, как и КПД всей установки, являются еще достаточно высокими ($\eta_z = 0,95$, $\eta_p = 0,91$, $\eta_{\text{сист}} = 0,87$). Если значения R_n соответствуют перезаряду конденсатора до напряжений выше 40 % от напряжения ФПН (по модулю), то КПД разрядной цепи и КПД всей системы значительно снижаются ($\eta_p = 0,8$, $\eta_{\text{сист}} = 0,75$).

Следовательно, энергоэффективными режимами, которые целесообразно реализовывать в электроразрядной системе, являются те режимы, при которых перезарядное напряжение конденсатора при его разряде на нагрузку не превышает 40 % от напряжения ФПН.

Выводы. 1. Реализация положительной обратной связи между зарядным и перезарядным напряжениями конденсатора в электроразрядных системах с электроискровой нагрузкой позволяет обеспечивать энергоэффективное регулирование режимов таких систем.

2. При изменении величины сопротивления нагрузки напряжение перезаряда конденсатора изменяется в соответствии с формулой (4), вызывая изменение напряжения его заряда в последующем цикле в соответствии с формулой (5). Величина прироста напряжения заряда (разряда) конденсатора с каждым циклом уменьшается и при достаточно большом количест-

ве зарядно-разрядных циклов стремится к нулю, то есть происходит стабилизация зарядного и разрядного напряжений конденсатора в системе.

3. С увеличением добротности разрядной цепи (вследствие уменьшения сопротивления нагрузки) напряжение перезаряда конденсатора и напряжение его последующего заряда также будут увеличиваться. При этом напряжение заряда конденсатора может превышать напряжение ФПН в 2,6 раза и более.

4. При уменьшении сопротивления нагрузки в 4,4 раза и соответственно увеличении добротности разрядной цепи в 1,93 раза, КПД зарядной и разрядной цепей конденсатора снижаются соответственно на 3 и 18 %, а КПД всей установки – на 32 %.

5. Для повышения энергоэффективности установки (КПД не менее 0,9) необходимо реализовать такую добротность разрядной цепи, чтобы абсолютное значение перезарядного напряжения конденсатора при его разряде на нагрузку не превышало 40 % от напряжения ФПН.

Определены коэффициенты полезного действия (КПД) зарядной и разрядной цепей конденсатора электро-разрядной системы, а также ее суммарный КПД при многократном колебательном заряде конденсатора от формирователя постоянного напряжения (ФПН) с последующим его колебательным разрядом на линейную нагрузку. Проведен анализ зависимости этих КПД от изменения величины сопротивления нагрузки в широком диапазоне, соответствующем изменению перезарядного отрицательного напряжения на конденсаторе по абсолютной величине от 10 до 80 % напряжения ФПН. Определены энергетически наиболее целесообразные зарядно-разрядные режимы конденсатора. Показано, что увеличение (по модулю) отрицательного начального напряжения на конденсаторе при неизменной добротности зарядной цепи, приводит, с одной стороны, к уменьшению КПД заряда, а с другой – к повышению напряжения заряда конденсатора.

Efficiency factor (EF) of the charging and discharge capacitor circuits of the electro discharge system, as well as the its total EF at a reiterated oscillatory charge of the capacitor from the former of direct voltage (FDV) and its subsequent oscillatory discharge on a linear load are determined. The analysis of dependence of these EF from changing of load resistance in a wide range and consequently changing of negative recharging voltage on the capacitor (an absolute value) from 10% up to 80 % of FDV voltage is carried out. The most energy-expedient charge-discharge regimes of the capacitor are determined. It is shown, that the increasing (on the module) the negative initial voltage on the capacitor at a constant quality factor of a charging circuit on the one hand results in decrease of charge EF, and on the other hand causes to rising of a charge voltage of the capacitor.

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. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 352 с.
4. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – К.: Наук. думка, 1982. – 424 с.
5. Супруновская Н.И. Энергетические характеристики при изменении начальных условий колебательного заряда конденсатора от источника постоянного напряжения // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 27–33.
6. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. – Киев: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.
7. 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.
8. 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.
9. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Повышение энергетических характеристик при аperiodической зарядке конденсатора от источника постоянного напряжения за счет изменения начальных напряжений на конденсаторе // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип.19. – С. 113–119.
10. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Анализ стабилизации зарядного напряжения конденсатора в электроимпульсной установке с электроискровой нагрузкой // Техн. електродинаміка. Темат. вип. „Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2009. – Ч.1. – С. 61–64.
11. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Анализ импульсных процессов при многократных зарядно-разрядных циклах конденсатора в цепях с электроискровой нагрузкой // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Мат. Междунар. науч. конф. (17-21 августа 2009). – Николаев: КП "Миколаївська обласна друкарня", 2009. – С. 189–191.

Надійшла 27.04.2010