

УДК 621.3.011:621.372

Н. И. Супруновская, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НАКОПИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА В ТИРИСТОРНОМ ФОРМИРОВАТЕЛЕ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ РЕГУЛИРУЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Проведен параметрический синтез трехконтурных цепей накопительного конденсатора в тиристорном формирователе разрядных импульсов, использующем регулирование обратной связи по напряжению для оптимизации средней импульсной мощности в нагрузке, электрическое сопротивление R_n которой может изменяться от разряда к разряду. Целевой функцией синтеза было выбрано повышение средней импульсной мощности в нагрузке, а критериями оптимизации – величина напряжения заряда конденсатора, коэффициент использования его энергии и КПД разрядной цепи. Определены оптимальные параметры элементов трехконтурных цепей конденсатора для достижения максимальной средней импульсной мощности в нагрузке при ограничениях, накладываемых длительностью паузы между включениями тиристорных коммутаторов, а также изменением добротности и КПД зарядного и разрядного контуров конденсатора. Библ. 8, рис.4, табл. 1.

Ключевые слова: параметрический синтез, накопительный конденсатор, отрицательная обратная связь, средняя импульсная мощность, напряжение заряда конденсатора.

Проведено параметричний синтез трьохконтурних кіл накопичувального конденсатора в тиристорному формувачі розрядних імпульсів, який використовує регулювання зворотного зв'язку по напрузі для оптимізації середньої імпульсної потужності в навантаженні, електричне опір R_n якого може змінюватися від розряду до розряду. Цільовою функцією синтезу було обрано підвищення середньої імпульсної потужності в навантаженні, а критеріями оптимізації - величина напруги заряда конденсатора, коефіцієнт використання його енергії й ККД розрядного кола. Визначено оптимальні параметри елементів трьохконтурних кіл конденсатора для досягнення максимальної середньої імпульсної потужності в навантаженні при обмеженнях, що накладаються тривалістю паузи між включеннями тиристорних комутаторів, а також зміною добротності й ККД зарядного й розрядного кіл конденсатора. Бібл. 8, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: параметричний синтез накопичувальний конденсатор, від'ємний зворотний зв'язок, середня імпульсна потужність, напруга заряда конденсатора.

Введение

Структурно-параметрический синтез многоконтурных электрических цепей заключается в определении их структуры и параметров элементов для достижения экстремума выбранной целевой функции [7, 8]. При синтезе цепей с полупроводниковыми коммутаторами возникает необходимость решать задачи оптимизации структуры схемы, параметров ее элементов и алгоритмов коммутации полупроводниковых ключей. Задачи указанного типа возникают и при синтезе структуры цепей формирователя разрядных импульсов (ФРИ) с накопительным конденсатором для электроимпульсных установок различного технологического назначения [1–6].

Анализ режимов установок объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) металлов в жидкости показывает, что с увеличением импульсной мощности, выделяемой в электроискровой нагрузке максимальные размеры получаемых электроэрозионных порошков уменьшаются [3–6]. Поэтому задача разработки ФРИ для получения наноразмерных электроэрозионных порошков может быть сведена к задаче синтеза электрических цепей такого ФРИ с определением условий и ограничений для достижения максимально возможной средней импульсной мощности, поглощаемой в электроискровой нагрузке.

Регулирование обратных связей по напряжению ФРИ позволяет уменьшать нестабильность энергетических и динамических параметров разрядных импульсов в нагрузке, даже если ее активное электрическое сопротивление R_n изменяется от разряда к разряду случайным образом [1–4, 5, 6]. Для изменения и стабилизации режимов ОЭИД металлов в жидкости обычно применяют регулирование отрицательной и положительной обратных связей величины напряжения заряда конденсатора от величины остаточного на нем напряжения при его предыдущем разряде. Реализация таких связей в тиристорных ФРИ с накопительным конденсатором возможна при наличии не менее трех контуров в его электрических цепях, а регулирование таких связей обычно осуществляется изменением электрического сопротивления нагрузки и алгоритма включения тиристорных коммутаторов. Таким образом, структурно-параметрический синтез цепей тиристорных ФРИ для установок ОЭИД металлов может быть сведен к алгоритмическому и параметрическому синтезу трехконтурных электрических схем.

Цель работы - проведение алгоритмически-параметрического синтеза цепей тиристорного формирователя разрядных импульсов с накопительным конденсатором для повышения средней импульсной мощности в нагрузке с учетом ограничений, определяемых реализацией регулируемых отрицательной и положительной обратных связей по напряжению.

Основной материал

Целевой функцией синтеза было повышение средней импульсной мощности в нагрузке $P_{ср\ n} = W_n / \tau_{разр}$ (где W_n – энергия, выделенная в нагрузке, $\tau_{разр}$ – длительность разрядного тока). Критериями оптимизации были величина напряжения заряда конденсатора $U_{Сзар}$, коэффициент использования его энергии $k_{исп\ C} = (W_n + W_{R2}) / W_{C\ max}$ и КПД разрядной цепи $\eta_2 = W_n / (W_n + W_{R2})$ (где W_{R2} – энергия, выделяемая на активном сопротивлении R_2 разрядного контура конденсатора, $W_{C\ max}$ – энергия, накопленная в конденсаторе на момент начала его разряда на нагрузку).

Структурная схема ФРИ для реализации зарядно-разрядных режимов конденсатора с регулируемой отрицательной и положительной обратной связью по напряжению представлена на рис. 1.

В схему входят: контур заряда конденсатора от формирователя постоянного напряжения (ФПН) $\Phi ПН - R_1 - VT_1 - L_1 - C - \Phi ПН$, контур разряда конденсатора на нагрузку $C - VT_2 - R_n - R_2 - L_2 - C$ и контур дополнительного обратного перезаряда конденсатора $C - R_3 - VT_3 - L_1 - C$ до некоторого напряжения U_{0C} .

Если электрическое сопротивление нагрузки R_n уменьшится, то величина напряжения U_{0C}

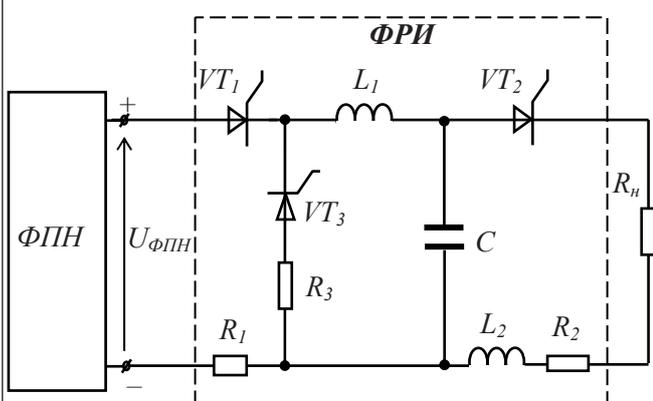


Рис. 1

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.

Были проведены исследования влияния начальных условий колебательного заряда конденсатора на диапазоны изменения напряжения заряда конденсатора и регулирования энергетических характеристик (средней импульсной мощности в нагрузке, КПД разряда) электроразрядных установок. Параметры зарядной, разрядной и перезарядной цепей такого ФРИ подбирались таким образом, чтобы реализовать колебательный заряд, разряд и перезаряд конденсатора.

Параметрический синтез цепей конденсатора ФРИ установок ОЭИД с регулируемой отрицательной и положительной обратной связью по напряжению с целью увеличения средней импульсной мощности в нагрузке. Параметрический синтез проводился с учетом трех критериев оптимизации: напряжения заряда конденсатора, КПД разрядной цепи и коэффициента использования конденсатора.

Принималось, что тиристорные коммутаторы VT_1 , VT_2 и VT_3 в схеме на рис. 1 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. Такое допущение позволяло оценивать энергетические характеристики разрядных импульсов и эффективность регулируемой обратной связи по напряжению в синтезируемых цепях тиристорных ФРИ при изменении сопротивления нагрузки R_n случайным образом.

При линеаризации разрядной цепи ФРИ и неизменной длительности разрядного тока в нагрузке увеличение в ней средней импульсной мощности пропорционально квадрату амплитуды разрядного тока и скорости его нарастания. Для увеличения скорости нарастания разрядного тока конденсатора можно уменьшать величину индуктивности L_2 разрядной цепи. Однако такое уменьшение имеет конструктивный предел $L_2 \approx 0,5 - 5$ мкГн. Увеличение разрядных токов и скоростей их нарастания в нагрузке возможно за счет увеличения напряжения заряда конденсатора. Но такой подход ограничивается напряжениями, допустимыми для тиристорных коммутаторов. Поэтому синтез цепей проводился при наличии ограничений на параметры элементов схемы и на критерии оптимизации.

При расчетах переходных процессов в цепях ФРИ были выбраны такие их параметры:

– в зарядной цепи: $U_{\Phi ПН} = 500$ В; $L_1 = 10^{-4}$ Гн; $C = 10^{-4}$ Ф; добротность $Q_1 = \sqrt{L_1}/R_1\sqrt{C} = 30$ (что соответствует значению $R_1 = 0,033$ Ом);

– в разрядной цепи: $L_2 = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн; $R_2 = 0,02$ Ом; $Q_2 = \sqrt{L_2}/(R_2 + R_n)\sqrt{C} = \text{var}$ в диапазоне 0,6...7 (следовательно, расчетный диапазон изменения $R_n = 0,012 \dots 0,363$ Ом);

– в цепи обратного перезаряда конденсатора: $Q_3 = \sqrt{L_1}/R_3\sqrt{C} = 30$ (что соответствует значению $R_3 = 0,033$ Ом).

В рассматриваемой схеме было проведено численное моделирование и расчет переходных процессов в операционной среде SIMULINK пакета прикладных программ MATLAB.

Очевидно, что момент включения перезарядного тиристора VT_3 (Δt_{VT_3}) влияет на начальные условия по напряжению и току переходных процессов в зарядном контуре конденсатора при неизменных параметрах элементов схемы.

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на конденсаторе при добротности разрядной цепи $Q_2 = 1,5$ (соответственно при $R_n = 0,13$ Ом). Период управляющих сигналов для всех тиристоров (VT_1 , VT_2 и VT_3) задавался 1200 мкс, а момент включения VT_3 изменялся от 800 до 1100 мкс.

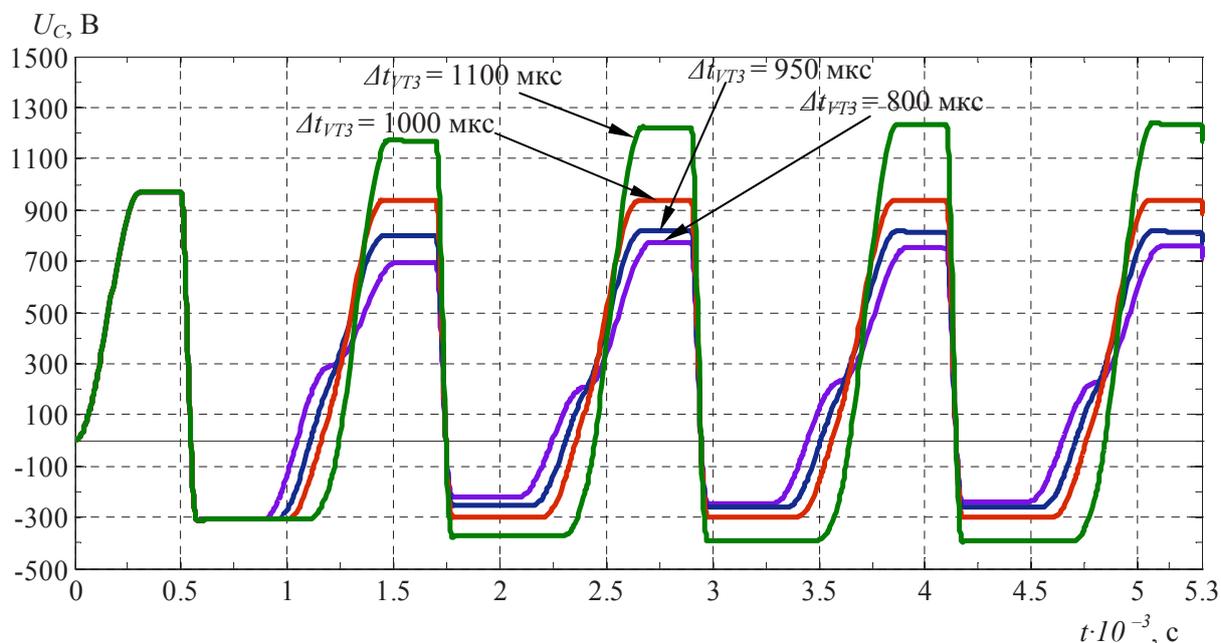


Рис. 2

Из рис. 2 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.

Были определены зависимости напряжения заряда конденсатора от временной паузы Δt_{VT_3} между включениями перезарядного тиристора VT_3 и зарядного тиристора VT_1 (принималось, что пауза $\Delta t_{VT_3} = 800 \dots 1100$ мкс) при изменении добротности разрядной цепи в диапазоне от 0,6 до 7. Для каждого из режимов были получены осциллограммы напряжения заряда конденсатора и определены диапазоны его изменения от $U_{Cзар min}$ до $U_{Cзар max}$ (где $U_{Cзар min}$ и $U_{Cзар max}$ – соответственно минимальное и максимальное напряжения заряда конденсатора).

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

Результаты анализа этих зависимостей приведены в табл. 1, а на рис. 3 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.

Таблица 1

$Q_2 = 0,6$ ($R_n = 0,363$ Ом)	$\Delta t_{VT_3},$ 10^{-3} с	$U_{Cзар},$ В	$P_{срн},$ 10^3 Дж / с	$k_{испC} = \frac{W_n + W_{R_2}}{W_{C max}},$ %	$\eta_2 = \frac{W_n}{W_n + W_{R_2}},$ %
	0,8	968	316,93	99,73	94,78
0,95	968	317,14	99,74	94,78	
1	969	317,14	99,56	94,77	
1,1	971	319,21	99,71	94,78	

$Q_2 = 1,5$ ($R_n = 0,129 \text{ Ом}$)	0,8	755	293,84	88,99	86,58
	0,95	815	341,77	89,06	86,58
	1	935	450,60	89,13	86,58
	1,1	1236	792,24	89,17	86,57
$Q_2 = 2,5$ ($R_n = 0,069 \text{ Ом}$)	0,8	666	172,88	71,79	77,54
	0,95	781	236,16	71,95	77,53
	1	1016	399,3	72,00	77,53
	1,1	1604	990,96	72,37	77,52
$Q_2 = 3,5$ ($R_n = 0,044 \text{ Ом}$)	0,8	628	113,50	60,15	69,09
	0,95	788	178,62	59,58	68,76
	1	1117	35,88	59,58	68,73
	1,1	1928	1054,43	59,06	68,46
$Q_2 = 5$ ($R_n = 0,035 \text{ Ом}$)	0,8	610	90,26	54,02	63,69
	0,95	799	154,30	53,99	63,63
	1	1179	335,12	53,94	63,58
	1,1	2113	1044,01	53,27	63,15
$Q_2 = 5,5$ ($R_n = 0,0207 \text{ Ом}$)	0,8	594	52,05	41,06	50,90
	0,95	834	108,63	43,54	50,86
	1	1326	271,43	43,21	50,86
	1,1	2468	917,14	41,85	50,86
$Q_2 = 7$ ($R_n = 0,012 \text{ Ом}$)	0,8	581	30,13	33,83	37,43
	0,95	874	73,27	36,25	37,51
	1	1453	198,87	35,56	37,50
	1,1	2775	697,03	34,13	37,50

Результаты, приведенные в табл. 1 и на рис. 3, показывают, что диапазон регулирования напряжения заряда конденсатора $U_{Cзар}$ зависит от временной паузы между включениями тиристоров VT_1 и VT_3 и от добротности разрядной цепи Q_2 .

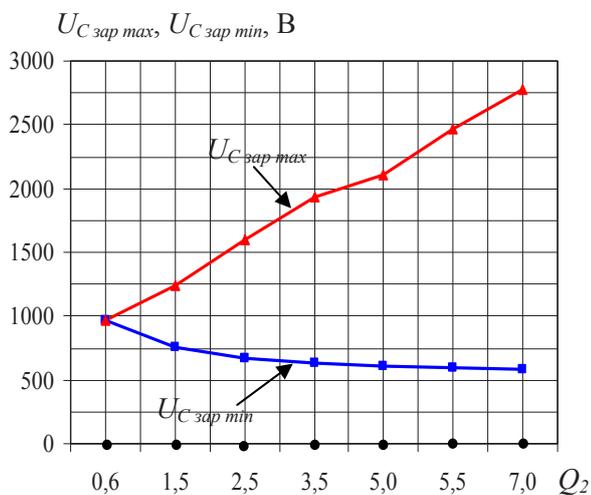


Рис. 3

Установлено, что при неизменных параметрах всех элементов схемы увеличение указанной паузы от 800 до 1100 мкс может в 1,1 – 4,8 раза увеличить напряжение последующего заряда конденсатора. Максимальное напряжение его заряда возникает при наименьшей паузе ($\Delta t_{VT3} = 800 \text{ мкс}$), а минимальные – при наибольшей ($\Delta t_{VT3} = 1100 \text{ мкс}$). Кроме того, чем выше добротность Q_2 , тем шире диапазон регулирования. Так, например, диапазон регулирования при $Q_2 = 7$ в 4,56 раза шире, чем при $Q_2 = 1,5$.

На рис. 4 приведены зависимости средней импульсной мощности в нагрузке $P_{срн}$ (рис. 4 а), КПД разрядной цепи η_2 и коэффициента использования энергии конденсатора $k_{испC}$ (рис. 4 б, в) от Δt_{VT3} при изменении добротности разрядной цепи Q_2 от 0,6 до 7.

Анализ параметров, приведенных в табл. 1 и на рис. 4, показывает, что $k_{испC}$ и η_2 уменьшаются при увеличении добротности разрядной цепи Q_2 и почти не зависят от длительности паузы Δt_{VT3} между включениями тиристоров VT_3 и VT_1 .

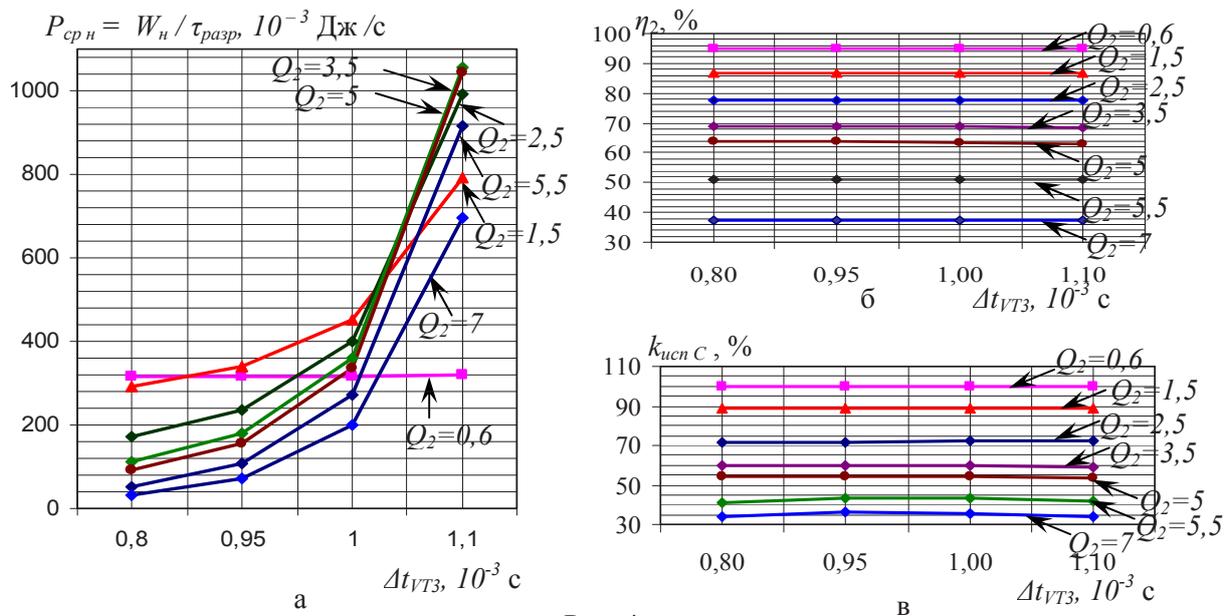


Рис. 4

Из рис. 4 видно, что увеличение паузы Δt_{VT3} для всех значений $Q_2 \geq 1,5$ вызывает монотонное возрастание средней импульсной мощности P_{cpn} в нагрузке. При этом надо учитывать, что значения P_{cpn} , соответствующие одним и тем же значениям Δt_{VT3} , возрастают при увеличении Q_2 в диапазоне от 0,6 до 5. При $Q_2 > 5$ они начнут уменьшаться (при сохранении общего монотонного возрастания P_{cpn}). Таким образом, изменением длительности паузы Δt_{VT3} можно регулировать как величину напряжения заряда конденсатора и накапливаемую в нем энергию, так и среднюю мощность, выделяемую в активном сопротивлении нагрузки.

Синтез цепей тиристорного ФРИ с регулируемой обратной связью по напряжению обосновывает целесообразность изменения добротности Q_2 в диапазоне от 1,5 до 2,5, что позволяет регулировать напряжение заряда конденсатора $U_{зар}$ от $1,5 U_{ФПН}$ до $3,2 U_{ФПН}$, увеличивать в 3 раза импульсную мощность в нагрузке P_{cpn} при КПД разрядной цепи $\eta_2 \approx 77 - 87 \%$ и коэффициента использования энергии конденсатора $k_{исп.с} \approx 75-89 \%$. Следует также отметить, что при стохастическом уменьшении сопротивления нагрузки R_n , соответствующем изменению Q_2 от 0,6 до 7 и повышению напряжения U_{Cmax} 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. На основе алгоритмического и параметрического синтеза трехконтурных цепей тиристорного формирователя разрядных импульсов с накопительным конденсатором обоснована возможность и установлены диапазоны повышения средней импульсной мощности в нагрузке P_{cpn} с учетом ограничений, определяемых схемной реализацией регулируемых отрицательной и положительной обратных связей по напряжению. Показано также влияние условий колебательного разряда конденсатора на изменение напряжения последующего его заряда, а также на энергетические и динамические характеристики таких формирователей.

2. Обосновано, что в трехконтурном тиристорном формирователе разрядных импульсов с регулируемой отрицательной и положительной обратной связью по напряжению целевую функцию (повышение средней импульсной мощности в нагрузке P_{cpn}) можно реализовать во всем исследуемом диапазоне изменения добротности разрядной цепи конденсатора Q_2 от 0,6 до 7. Но энергетически наиболее целесообразным является изменение сопротивления нагрузки R_n , при котором добротность Q_2 изменяется от 1,5 до 2,5. В таком случае значение P_{cpn} можно увеличить в 3 раза при КПД разрядной цепи $\eta_2 \approx 77 - 87 \%$ и коэффициенте использования энергии конденсатора $k_{исп.с} \approx 75-89 \%$. При повышении зарядного напряжения конденсатора U_{Cmax} до значений, недопустимых для современных тиристорных коммутаторов регулируемая обратная связь за счет изменения паузы Δt_{VT3} позволяет снизить это напряжение до приемлемых значений.

Список литературы

1. Вовченко А. И., Дивак Н. П. Синтез емкостных энергоисточников для высоковольтных электротехнологических установок с учетом предразрядных процессов // Вестник Национального

технического университета "Харьковский политехнический институт". Сборник научных трудов. Тематический выпуск: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Харьков: НТУ "ХПИ". – №18. – 2010. – С. 61–67.

2. *Кравченко В. И., Петков А. А.* Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // *Електротехніка і електромеханіка.* – 2007. – № 6. – С. 70–75.

3. *Супруновская Н. И.* Метод формирования мощных разрядных импульсов с повышенной скоростью нарастания токов в нагрузке // *Техн. електродинаміка.* – 2012. – № 2. – С. 109–110.

4. *Шидловский А. К., Щерба А. А., Супруновская Н. И.* Энергетические процессы в цепях заряда и разряда конденсаторов электроимпульсных установок // *К.: Интерконтиненталь-Украина,* 2009. – 208 с.

5. *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.

6. *Щерба А. А., Супруновская Н. И.* Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // *Техн. електродинаміка.* – 2012. – № 5. – С. 3–9.

7. *Долбня В. Т.* Топологический анализ и синтез электрических и электромеханических систем. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – 356 с.

8. *Качанов Н.С.* Основы синтеза линейных электрических цепей во временной области. – М.: Связь, 1967. – 200 с.

STRUCTURE-PARAMETRIC SYNTHESIS OF RESERVOIR CAPACITOR CIRCUITS IN THYRISTOR DISCHARGE PULSES FORMER OF REGULATED VOLTAGE

N.I. Suprunovskaya

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

It is performed the parametric synthesis of the reservoir capacitor circuits in the discharge pulses former (DPF) of installation for a volumetric electro-spark dispersion (VESD) of metal with a positive back coupling of charge capacitor store voltage from a residual voltage after its previous discharge. Objective function was increasing of average pulse power in the load, and optimization criterions were capacitor charge voltage, efficiency factor of discharge circuit and use factor of capacitor. Optimal values of parameters of circuit elements of DPF (taking into account their restrictions for conservation of dispersion process) at which the maximum average pulse power in the load is attained are defined. Ref. 8, fig. 4, tab. 1.

Keywords: *parametric synthesis, reservoir capacitor, average pulse power, capacitor charge voltage.*

1. *Vovchenko A.A., Divak N.P.* Synthesis of capacitive power-suppliers for high-voltage electro-technological installations subject to pre-discharge processes // *Vestnik Natsionalnogo tehniceskogo universiteta "Kharkovskiy politekhnicheskij institut". Transactions. Subject Issue: Teknika I elektrophysika vysokih napryazheniy.* –Kharkov: NTU "KhPI". – #18. – 2010. – P. 61–67. (Rus.)

2. *Kravchenko V.I., Petkov A.A.* Parametrical synthesis of high-voltage pulse test device with capacitive energy storage // *Elektrotehnika I elektromehanika.* –2007. – #6. – P.70–75. (Rus.)

3. *Suprunovskaya N.I.* Method for forming of high-power discharge pulses with high rate of current rise in load // *Tekhnichna elektrodynamika.* – 2012. – № 2. – P. 109–110. (Rus.)

4. *Shidlovskiy A.K., Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I.* Power processes in the electropulse installations with capacitive energy storages. – Kiev: Intercontinental-Ukraine, 2009. –208 p. (Rus.)

5. *Shcherba A.A.* Principles of construction and stabilization of parameters of semi-conductor electropulse systems for electro-spark dispersion of current-conducting materials layer // *Stabilizatsiya parametrov elektricheskoy energii.* – Kiev: IED AN Ukrainy, 1991. – P. 12–30. (Rus.)

6. *Shcherba A.A. Suprunovskaya N.I.* Increasing regularities of rate of current rise in the load at limiting its maximal values // *Tekhnichna elektrodynamika.* – 2012. – № 5. – С. 3–9. (Rus.)

7. *Dolbnya V.T.* The topological analysis and synthesis of electric and electromechanical systems. – Kharkov: NTU "KhPI", 2005. – 356 p. (Rus.)

8. *Kachanov N.S.* Basis of synthesis of linear electric circuits in time domain. – Moskva: Svyaz, 1967. – 200 p. (Rus.)