

УДК 621.3.011:621.372

А. А. Щерба, чл.-корр. НАН Украины, Н. И. Супруновская, канд. техн. наук

Л.П. Маслак, О. А. Белецкий

Институт электродинамики НАН Украины, м. Киев, Украина

СИНТЕЗ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ ЦЕПЕЙ ТИРИСТОРНЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Выполнен синтез двухконтурных электрических цепей накопительного конденсатора в тиристорном формирователе разрядных токов в технологической 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 двухконтурных цепей конденсатора для достижения максимальной средней импульсной мощности в нагрузке при ограничениях, накладываемых свойствами тиристорных коммутаторов, а также изменением добротности и КПД зарядного и разрядного контуров конденсатора. Библи. 8, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: параметрический синтез, накопительный конденсатор, колебательный разряд, напряжение заряда конденсатора, средняя импульсная мощность.

Виконано синтез двоконтурних електричних кіл накопичувального конденсатора в тиристорному формувачі розрядних струмів у технологічному навантаженні, електричний 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 заряду конденсатора, коефіцієнт використання його енергії й ККД розрядного кола. Визначено оптимальні параметри елементів двоконтурних кіл конденсатора для досягнення максимальної середньої імпульсної потужності в навантаженні при обмеженнях, що накладаються властивостями тиристорних комутаторів, а також зміною добротності й ККД зарядного й розрядного кіл конденсатора. Бібл. 8, Рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: параметричний синтез, накопичувальний конденсатор, коливальний розряд, напруга заряду конденсатора, середня імпульсна потужність.

Введение

Так как все электротехнические системы имеют структуру, элементы которой имеют электрические параметры, то практически любая задача реализации необходимого электротехнологического процесса может быть сведена к задаче структурно-параметрического синтеза. Если структура системы в процессе синтеза остается постоянной, а нужно найти оптимальные значения параметров ее элементов при выполнении условий реализации заданного технологического процесса, то такой синтез является параметрически оптимальным по заданным критериям. [7, 8].

Данные исследования посвящены параметрическому синтезу двухконтурных электрических цепей накопительного конденсатора тиристорных формирователей разрядных импульсов (ФРИ) в технологической нагрузке, активное электрическое сопротивление R_n которой может изменяться от разряда к разряду, как в установках объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) металлов в диэлектрической жидкости [4]. В настоящее время метод ОЭИД используется для получения микроразмерных порошков металлов и сплавов. На основании многочисленных экспериментальных данных известно, что размеры искроэрозионных порошков тем меньше, чем меньше длительность разрядных импульсов и больше средняя импульсная мощность, выделяемая в нагрузке [1–3, 5, 6]. Поэтому ограничение длительности разрядных импульсов приводит к уменьшению максимальных размеров частиц получаемых искроэрозионных порошков.

При всех прочих равных условиях количество порошка, получаемого за время длительности $\tau_{разр}$ одного разрядного импульса пропорционально энергии W_n , выделенной в нагрузке. Однако максимальные размеры порошка определяются динамическими параметрами разрядного импульса, в частности средней импульсной мощностью, выделяемой в нагрузке $P_{ср\ n} = W_n / \tau_{разр}$. То есть энергетические параметры ФРИ определяют количество искроэрозионного порошка, полученного за все время работы установки ОЭИД, а динамические параметры разрядных импульсов – качество данного порошка при условии сохранения данного электрофизического процесса. Существуют

допустимые отклонения динамических параметров, при которых сохраняется исследуемый процесс ОЭИД (в противном случае может возникнуть качественно другой процесс: нагревание металлических гранул, их сваривание или взрыв).

Использование положительной обратной связи величины напряжения заряда емкостного накопителя энергии (конденсатора) от величины остаточного напряжения при его предыдущем разряде в формирователях разрядных импульсов установок ОЭИД, как правило, уменьшает электроискровое сопротивление нагрузки при последующем разряде накопителя [1–3, 5, 6]. Такая зависимость применяется для повышения напряжения заряда конденсатора и увеличения разрядных токов в нагрузке при увеличении ее сопротивления. Изменяя величину начального напряжения на конденсаторе, можно регулировать как напряжение его заряда, так и энергетические характеристики цепей ФРИ установки ОЭИД, в частности КПД цепей, среднюю импульсную мощность, выделяемую в нагрузку, коэффициент использования энергии конденсатора.

Таким образом задача разработки ФРИ с положительной обратной связью по напряжению для получения нанопорошков методом ОЭИД сводится к задаче параметрического синтеза цепей такого ФРИ для получения максимально возможной средней импульсной мощности разрядных токов в нагрузку.

Поэтому **целью** настоящей работы был выбран параметрический синтез двухконтурных электрических цепей накопительного конденсатора в тиристорных ФРИ с положительной обратной связью по напряжению для определения условий повышения средней импульсной мощности в нагрузке.

Основной материал

Структурная схема двухконтурного полупроводникового ФРИ с положительной обратной связью по напряжению, используемого в установках ОЭИД слоя металлических гранул в жидкости приведена на рис. 1. Накопительный конденсатор такого ФРИ заряжается от формирователя постоянного напряжения (ФПН) по контуру $\Phi П Н - R_1 - VT_1 - L_1 - C - \Phi П Н$. Разряд конденсатора на нагрузку происходит по контуру $C - VT_2 - R_n - R_2 - L_2 - C$.

Параметры зарядной и разрядной цепей такого ФРИ подбираются таким образом, чтобы реализовать колебательный заряд и разряд конденсатора. Процесс разряда конденсатора на нагрузку заканчивается его перезарядом до небольших (по сравнению напряжением его заряда) отрицательных напряжений, способствующих естественному запирающему разрядного тиристора VT_2 . Следующий заряд конденсатора начинается при отрицательном на нем начальном напряжении U_{0C} .

Поскольку коэффициент повышения напряжения γ на конденсаторе при ненулевом начальном напряжении ($U_{0C} \neq 0$) равен $\gamma = 1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}} \left(1 - \frac{U_{0C}}{U_{\Phi П Н}} \right)$, то конденсатор будет заряжаться до большего напряжения, чем при начальном напряжении $U_{0C} = 0$ [4]. В результате этого при последующем разряде конденсатора возникнет его перезаряд до еще большего отрицательного напряжения. Таким образом, при зарядно-разрядных циклах накопительного конденсатора возникает положительная обратная связь по напряжению.

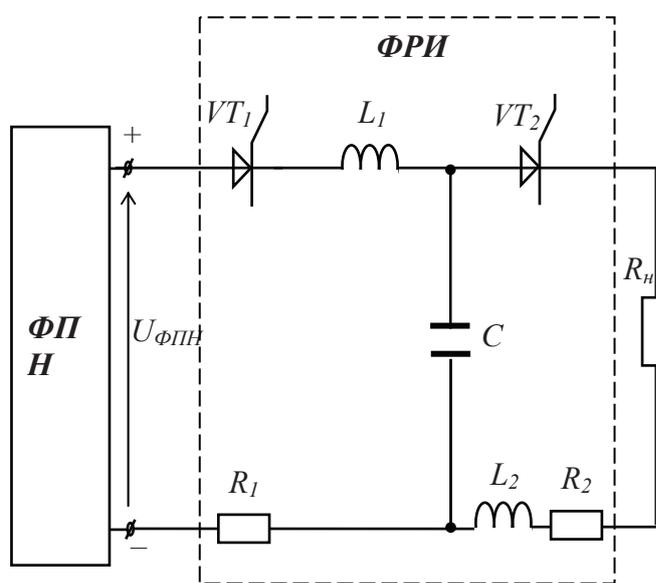


Рис. 1

Переходные процессы рассматривались при допущении, 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 синтезируемых цепях ФРИ при изменении величины R_n случайным образом.

Параметрический синтез цепей конденсатора ФРИ установок ОЭИД с положительной обратной связью по напряжению с целью увеличения средней импульсной мощности в нагрузке. Целевой функцией синтеза выбрано

повышение средней импульсной мощности в нагрузке $P_{ср н} = W_n / \tau_{разр}$. Для оптимального параметрического синтеза принимались три критерия оптимизации (хотя обычно не удается достичь максимума целевой функции сразу по нескольким критериям) – напряжение заряда конденсатора U_{Cmax} , КПД разрядной цепи η_2 и коэффициент использования энергии конденсатора $k_{исп с}$.

Если в схеме на рис. 1 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 $U_{Cmax} \gg 2 U_{ФПН}$ (где $U_{ФПН}$ – напряжение на выходе ФПН) [4].

Ранее указывалось, что электрическое сопротивление нагрузки является неизменным в течение разрядного импульса и может изменяться в течение паузы между разрядами. Следовательно, при анализе переходных процессов можно считать, что добротность разрядного контура Q_2 изменяется таким же образом. При линейзации зарядно-разрядных цепей ФРИ говоря об импульсной мощности, можно говорить о величине токов и скоростях их нарастания. Известно, что для получения больших разрядных токов с высокими скоростями их нарастания необходимо минимизировать индуктивность цепи и увеличивать напряжение заряда конденсатора. Однако, уменьшение индуктивности разрядного контура L_2 менее 5 мкГн и увеличение напряжения заряда конденсатора более 1000 В в полупроводниковых ФРИ технически сложно реализовать. Поэтому при их разработке является важным выбор целесообразных диапазонов изменения параметров всех элементов.

Поэтому при расчетах переходных процессов в цепях ФРИ были выбраны следующие параметры цепей:

– в зарядной цепи: $U_{ФПН} = 500$ 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 $R_n = 0,012...0,363$ Ом);

Переходные процессы рассчитывались при изменении добротности разрядного контура Q_2 от 0,6 до 7.

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

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения на конденсаторе при двух значениях добротности разрядной цепи: $Q_2 = 0,6$ (соответственно при $R_n = 0,363$ Ом) и $Q_2 = 5$ (соответственно при $R_n = 0,035$ Ом).

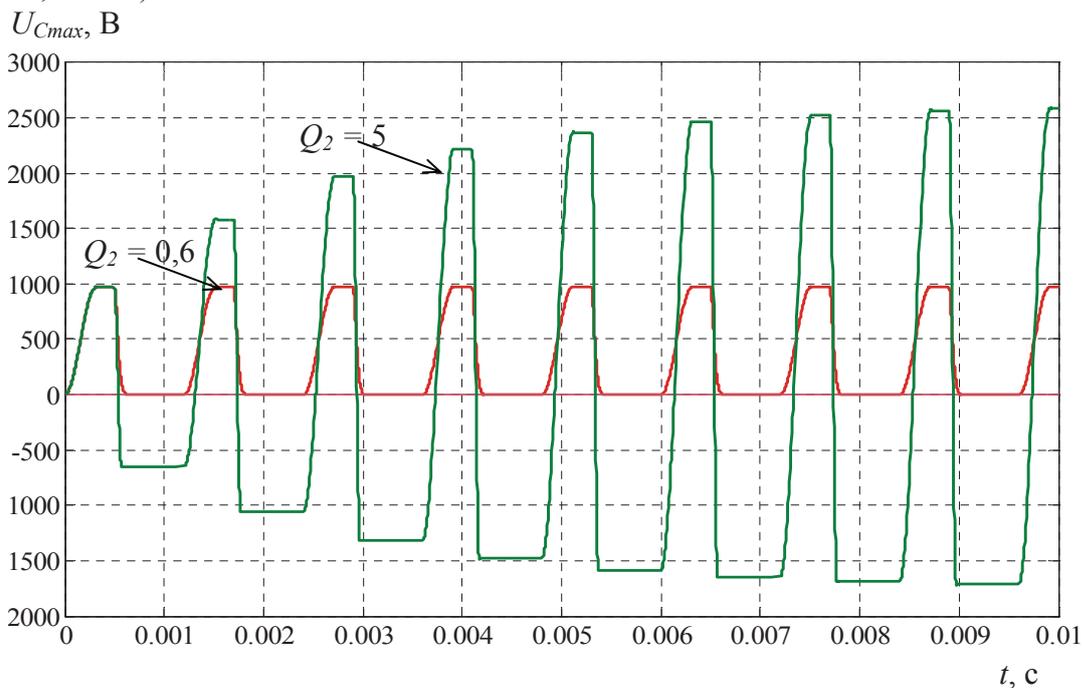


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что при невысокой добротности контура $Q_2 = 0,6$, когда разряд конденсатора приближается к аperiодическому режиму и проходит с очень маленьким перезарядом до

отрицательного напряжения, напряжение заряда конденсатора U_{Cmax} остается практически неизменным. Однако при достаточно высокой добротности разрядного контура ($Q_2 = 5$) конденсатор перезаряжается до значительных отрицательных напряжений и напряжение заряда конденсатора U_{Cmax} возрастая от цикла к циклу достигает установившегося значения, которое в пять раз превышает напряжение ФПН.

Была определена зависимость напряжения заряда конденсатора U_{Cmax} и средней импульсной мощности в нагрузке $P_{cpn} = W_n / \tau_{разр}$ от добротности разрядной цепи Q_2 . Также исследовался характер изменения коэффициента использования конденсатора $k_{испC} = (W_n + W_{R2}) / W_{Cmax}$ и КПД разрядной цепи $\eta_2 = W_n / (W_n + W_{R2})$ (где W_{R2} – энергия, выделенная на ее активном сопротивлении R_2 , W_{Cmax} – максимальная энергия, накопленная в конденсаторе на момент его разряда) при изменении добротности Q_2 от 0,6 до 7. Полученные результаты отражены в табл. 1.

На рис. 3 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: a – U_{Cmax} и P_{cpn} , b – $k_{испC}$ и η_2 .

Исследования показали, что увеличение добротности разрядного контура приводит к росту напряжения заряда конденсатора U_{Cmax} . При этом средняя импульсная мощность в нагрузке P_{cpn} 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_{cpn} 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_{cpn} уменьшится в $\approx 1,5$ раза по сравнению с ее значением при $Q_2 \approx 5$. В тоже время при увеличении значений Q_2 от 0,6 до 7 величина максимального напряжения заряда конденсатора U_{Cmax} 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 $k_{испC}$ – в 3 раза

Таблица 1

| параметры Q_2 | U_{Cmax} , В | W_n , Дж | $\tau_{разр}$, 10^{-6} с | $P_{cpn} = \frac{W_n}{\tau_{разр}}$, 10^3 Дж/с | W_{Cmax} , Дж | $k_{испC} = \frac{W_n + W_{R2}}{W_{Cmax}}$ | $\eta_2 = \frac{W_n}{W_n + W_{R2}}$, % |
|-------------------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------|--|--------------------|--|--|
| $Q_2 = 0,6$ ($R_n = 0,363$ Ом) | 974,4 | 44,9 | 138,5 | 324,1 | 47,53 | 99,67 | 94,79 |
| $Q_2 = 1,5$ ($R_n = 0,129$ Ом) | 1397,5 | 75,1 | 74,7 | 1005 | 97,45 | 89,01 | 86,58 |
| $Q_2 = 2,5$ ($R_n = 0,069$ Ом) | 1902,7 | 100,7 | 71,8 | 1402,4 | 180,53 | 72,39 | 77,06 |
| $Q_2 = 3,5$ ($R_n = 0,044$ Ом) | 2339,4 | 111,7 | 71,1 | 1571,6 | 272,87 | 59,55 | 68,74 |
| $Q_2 = 5$ ($R_n = 0,035$ Ом) | 2565,1 | 112,7 | 70,9 | 1589,5 | 328,09 | 53,98 | 63,64 |
| $Q_2 = 5,5$ ($R_n = 0,0207$ Ом) | 3099,8 | 102,37 | 70,8 | 1445,9 | 478,94 | 42,03 | 50,86 |
| $Q_2 = 7$ ($R_n = 0,012$ Ом) | 3528,2 | 74,27 | 70,6 | 1051,9 | 588,8 | 33,64 | 37,50 |

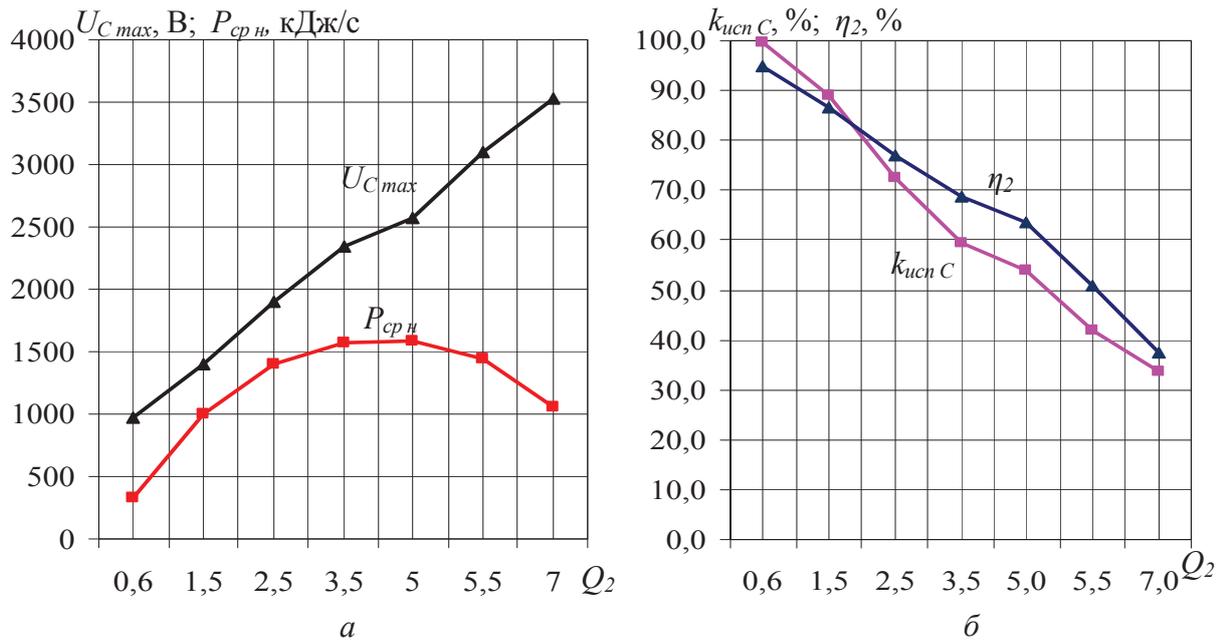


Рис. 3

Следует отметить, что указанный параметрический синтез электрических цепей двухконтурного ФРИ учитывает ограничения, накладываемые на параметры элементов цепей и то, что положительная обратная связь по напряжению в таком ФРИ является нерегулируемой, то есть она не способна регулировать напряжение заряда конденсатора U_{Cmax} до значений, недопустимых для современных полупроводниковых коммутаторов при стохастических изменениях сопротивления нагрузки R_n .

Таким образом, в результате проведенной параметрической оптимизации элементов цепей накопительного конденсатора ФРИ с положительной обратной связью по напряжению установлено, что добротность разрядной цепи Q_2 энергетически и технологически целесообразно изменять от 1,5 до 2,5. При изменении Q_2 в таком диапазоне напряжение заряда конденсатора U_{Cmax} можно регулировать от $1,5 U_{ФПН}$ до $3,2 U_{ФПН}$, а среднюю импульсную мощность в нагрузке $P_{срн}$ можно увеличивать в ≈ 3 раза (по сравнению с режимами без обратной связи) при достаточно высоких значениях КПД разрядной цепи $\eta_2 \approx 77-87\%$ и коэффициента использования энергии конденсатора $k_{испс} \approx 75-89\%$.

Выводы

1. Проведенный параметрический синтез двухконтурных цепей накопительного конденсатора тиристорных ФРИ с положительной обратной связью по напряжению показал, что использование такой связи позволяет осуществлять повышение средней импульсной мощности в нагрузке, как целевой функции синтеза, с учетом ограничений, возникающих при увеличении напряжения колебательного заряда конденсатора, коэффициента использования его энергии, добротности и КПД его разрядной цепи.

2. С учетом выбранной целевой функции (повышения средней импульсной мощности), которая может быть физически реализуема в исследуемых электрических схемах ФРИ, выполнена оптимизация параметров элементов таких схем. В результате проведенной параметрической оптимизации установлено, что добротность разрядной цепи Q_2 энергетически и технологически целесообразно изменять от 1,5 до 2,5. При этом напряжение заряда конденсатора $U_{сзар}$ можно регулировать от $1,5 U_{ФПН}$ до $3,2 U_{ФПН}$, а импульсную мощность в нагрузке $P_{срн}$ можно увеличивать в ≈ 3 раза (по сравнению с режимами без обратной связи) при достаточно высоких значениях КПД разрядной цепи ($\eta_2 \approx 77-87\%$) и коэффициента использования энергии конденсатора ($k_{испс} \approx 75-89\%$).

Список литературы

1. Вовченко А. А., Посохов А. А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. К.: –Наукова думка. – 1992. – 168 с.
2. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. – М: Энергоатомиздат, 1983. – 352 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 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. электродинамика. – 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.

SYNTHESIS OF CHARGE-DISCHARGE CIRCUITS OF THYRISTOR FORMERS OF DISCHARGE PULSES WITH POSITIVE BACK COUPLING ON VOLTAGE

A.A Shcherba, N.I. Suprunovskaya, L.P. Maslak, O.A. Beletsky
Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: iednat1@gmail.com

It is performed the synthesis of the two-circuit reservoir capacitor circuits in the thyristor discharge current former in technological load which electrical resistance can change from one discharge to another. Objective function of synthesis was a increasing of average pulse power in the load, and optimization criterions were the capacitor charge voltage, efficiency factor of discharge circuit and use energy factor of capacitor. Optimal parameters of elements of two-circuit capacitor circuits (taking into account restrictions due to properties of thyristor commutator and Q-factor changing as well as efficiency factor of charge and discharge capacity circuits) at which the maximum average pulse power in the load is attained are defined. Ref. 8, fig. 3, tab. 1.

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

1. *Vovchenko A.A., Posokhov A.A.* Controlled electroexplosive processes of energy transformation in the condensed medium. – Kyiv: Naukova dumka, 1992. – 168 p. (Rus.)
2. *Livshits A.L., Otto M.Sh.* Pulse electrical engineering. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 352 p. (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. – С. 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 electro-pulse 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.)