

УДК 621.3.011:621.372

**СИНТЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ЕМКОСТНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ
В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЯХ МОЩНЫХ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

А.А.Щерба, чл.-корр. НАН Украины, **Н.И.Супруновская**, канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина. E-mail: iednat1@gmail.com

Выполнен структурно-параметрический синтез двух- и трехконтурных электрических цепей с емкостным накопителем энергии (ЕНЭ) в тиристорных формирователях разрядных импульсов (ФРИ) для питания технологической нагрузки, электрическое сопротивление R_n , которой зависит от напряжения заряда ЕНЭ и стохастически изменяется от разряда к разряду. Целевой функцией синтеза выбрано повышение средней импульсной мощности в нагрузке, а критериями оптимизации – величину напряжения заряда конденсатора, коэффициент использования его энергии и КПД разрядной цепи ЕНЭ. Учитывались энергетические и динамические ограничения, накладываемые на целевую функцию и параметры элементов цепей. Библи. 11, рис. 9, табл. 4.

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

Многие работы в области импульсной электротехники посвящены повышению мощности разрядных импульсов в нагрузке для разработки новых электроимпульсных технологий [1, 2, 5, 7, 8, 10]. Повышение средней импульсной мощности в нагрузке путем оптимизации структур и параметров элементов электрических цепей разрядно-импульсных устройств предполагает решение двух противоположных по исходным данным и конечным целям, но взаимосвязанных между собой групп задач – задач анализа и синтеза [2, 5].

Целью анализа является расчет электрических процессов в цепях с заданными структурой и параметрами всех элементов (например, расчет изменений во времени токов в ветвях электрической цепи при известных падениях напряжений на ее элементах) [3]. Если все элементы цепи заданы детерминированными параметрами, то решение задач ее анализа всегда будет однозначным.

Целью синтеза является обратная задача – отыскание структуры электрической цепи и характеристик ее элементов, при которых электрический процесс будет подчиняться изначально заданным закономерностям. Задачу синтеза можно решить путем анализа ряда цепей с последующим выбором наиболее подходящей, оптимальной цепи [3]. Уже в такой постановке задачи синтеза возникает вопрос о разработке требований к электрической цепи, которые могут иметь количественный и качественный характер, отражать электротехнические, технологические и экономические характеристики. Им должны удовлетворять структура электрических цепей и выбираемые параметры ее элементов. Такая постановка задачи синтеза предопределяет неоднозначность ее решения [3, 4, 6, 9].

Из всех известных накопителей емкостные накопители энергии (ЕНЭ) допускают наиболее высокие динамические параметры (в частности скорость нарастания тока), поэтому проектирование большинства электроразрядных устройств основывается на синтезе разветвленных электрических цепей с емкостными накопителями энергии [1, 2, 5, 7, 8, 10, 11]. Поскольку синтез электрических цепей основывается на их общих свойствах, получаемых путем их анализа, то синтезу линейных и нелинейных цепей должен предшествовать их всесторонний анализ [3, 6].

Естественно, что наибольшей теоретической разработке поддаются задачи анализа и синтеза линейных электрических цепей с элементами, параметры которых не зависят от протекающего в них тока и от падений напряжений на них. Но при применении нелинейных элементов возможности синтеза цепей существенно возрастают. Возрастает и важность проведения предварительного анализа нелинейных цепей, поскольку на основании полученных при анализе результатов можно оценить возможности использования нелинейных элементов для синтеза электрических цепей. Использование методов их синтеза позволяет, исходя из общих свойств цепей, разрабатывать рекомендации для определения их структуры и параметров элементов с наперед заданными характеристиками [3].

В электрических цепях полупроводниковых формирователей разрядных импульсов (ФРИ) напряжением 0,5–2 кВ и током более 1 кА обычно применяют тиристорные коммутаторы [7, 8, 10, 11],

которые по сравнению с газоразрядными коммутаторами (используемыми в высоковольтных установках [1, 2, 5]) имеют меньшие коммутационные потери и более просты в обслуживании. Кроме того, для уменьшения потерь в цепях ФРИ и упрощения алгоритмов управления тиристорными коммутаторами необходимо синтезировать структуру с минимальным количеством электрических контуров, составляющих их элементов и узлов принудительной коммутации тиристорных. Такие задачи возникают, например, при синтезе электрических цепей тиристорных ФРИ для установок объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) слоя металлических гранул, активное электрическое сопротивление R_n которых может стохастически изменяться от разряда к разряду [8, 10].

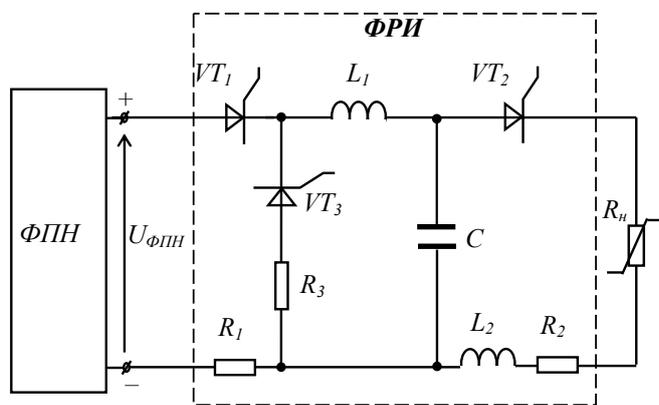


Рис. 1

энергии (конденсатора) ФРИ установок ОЭИД с величиной остаточного напряжения при его предыдущем разряде изменяет сопротивление электроискровой нагрузки при последующем его разряде [8]. 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.

Установки ОЭИД металлических гранул в основном используются для получения микроразмерных электроэрозионных порошков. Экспериментальные исследования показали, что количество порошка, получаемого за время длительности $\tau_{разр}$ одного разрядного импульса, пропорционально энергии W_n , выделенной в слое металлических гранул (то есть в нагрузке). При этом с уменьшением длительности и увеличением средней импульсной мощности разрядных импульсов $P_{ср н} = W_n / \tau_{разр}$ максимальные размеры частиц получаемого порошка становятся меньше [7, 8, 11]. Следовательно, для получения субмикронных и наноразмерных электроэрозионных порошков целесообразно увеличивать импульсную мощность в нагрузке и динамические параметры разрядных импульсов.

Определение условий реализации максимальной импульсной мощности в нагрузке, электрическое сопротивление которой стохастически изменяется от разряда к разряду, можно свести к поиску максимума целевой функции (указанной импульсной мощности) с управляемыми переменными (параметрами элементов электрических цепей ФРИ). Многокритериальный параметрический синтез цепей ФРИ позволяет найти максимум заданной целевой функции на допустимом множестве решений с учетом ограничений, накладываемых на эту функцию и указанные параметры [2, 4–6, 9].

Поэтому **целью** настоящей работы являлось проведение синтеза двух- и трехконтурных электрических цепей с емкостным накопителем энергии в тиристорных ФРИ с положительной и отрицательной обратными связями по напряжению для определения условий максимально возможного повышения средней импульсной мощности в нагрузке.

Для достижения указанной цели понадобилось решить следующие задачи:

- выполнить параметрический синтез двухконтурных электрических цепей тиристорного ФРИ с положительной обратной связью по напряжению и определить условия, ограничивающие повышение в нем средней импульсной мощности в нагрузке;

- осуществить синтез трехконтурных электрических цепей ФРИ с регулируемым положительной и отрицательной обратными связями по напряжению, расширяющими диапазон возможных стохастических изменений активного сопротивления нагрузки.

На рис. 1 показана многоконтурная схема тиристорного ФРИ, в котором могут быть реализованы положительная и отрицательная обратные связи между напряжением заряда накопительного конденсатора C и остаточным напряжением предыдущего его разряда.

Предварительный анализ показал, что для повышения средней импульсной мощности в нагрузке в ФРИ целесообразно реализовывать положительную обратную связь, а для уменьшения нестабильности параметров разрядных импульсов – отрицательную [8].

Реализация обратной связи величины зарядного напряжения емкостного накопителя

Синтез двухконтурных электрических цепей с положительной обратной связью по напряжению. В схеме на рис. 1 двухконтурная цепь возникает, если исключить тиристор VT_3 . Конденсатор в такой схеме заряжается от формирователя постоянного напряжения (ФПН) по контуру $\Phi ПН - R_1 - VT_1 - L_1 - C - \Phi ПН$ 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).

Параметры зарядной и разрядной цепей ФРИ были выбраны таким образом, чтобы реализовать колебательные заряд и разряд конденсатора. В таком случае процесс разряда конденсатора на нагрузку завершается его перезарядом до отрицательных напряжений, достаточных для естественного запирающего разрядного тиристора VT_2 , а следующий заряд конденсатора начнется при отрицательном начальном напряжении U_{0C} . Поскольку коэффициент повышения напряжения γ на конденсаторе при ненулевом начальном напряжении ($U_{0C} \neq 0$) равен $\gamma = 1 + e^{-\pi/2Q}(1 - U_{0C}/U_{\Phi ПН})$, то конденсатор зарядится до большего напряжения, чем при нулевом начальном напряжении ($U_{0C} = 0$) [8]. При последующем разряде конденсатора возникнет его перезаряд до еще большего отрицательного напряжения, реализуя положительную обратную связь по напряжению. В установившемся процессе конденсатор зарядится до напряжения $U_{Cmax} \gg 2 U_{\Phi ПН}$ (где $U_{\Phi ПН}$ – напряжение на выходе ФПН) [8].

Целевой функцией параметрического синтеза двухконтурной схемы выбрано повышение средней импульсной мощности в нагрузке, а оптимизация проводилась по трем критериям – максимальному напряжению заряда конденсатора U_{Cmax} , КПД разрядной цепи $\eta_2 = W_n/(W_n + W_{R2})$ и коэффициенту использования энергии конденсатора $k_{исп C} = (W_n + W_{R2})/W_{Cmax}$ (где W_{R2} – энергия, выделенная на сопротивлении R_2 , W_{Cmax} – максимальная энергия в конденсаторе на момент начала его разряда).

При выборе оптимальных параметров элементов цепей ФРИ учитывалось, что в течение длительности одного разрядного импульса активное электрическое сопротивление нагрузки R_n является постоянным, но может стохастически изменяться во время паузы между разрядными импульсами [8, 10]. Такое допущение позволяет оценивать энергетические параметры и эффективность параметрической обратной связи в синтезируемых цепях ФРИ при изменении величины R_n случайным образом.

Известно, что для увеличения импульсной мощности в нагрузке, амплитуды разрядных токов и скоростей их нарастания необходимо уменьшать 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 затруднительно. Поэтому параметрический синтез двухконтурной схемы ФРИ необходимо осуществлять с учетом указанных ограничений, накладываемых на параметры ее элементов.

На основании экспериментальных исследований было 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 от 0,012 до 0,363 Ом, а добротность разрядной цепи Q_2 – от 0,6 до 7 [8].

С учетом ограничения напряжения на тиристорных коммутаторах, которые не должны превышать 2 кВ, и минимизации потерь энергии во всех элементах было определено, что в двухконтурных схемах ФРИ допустимы параметры: емкость накопительного конденсатора $C \approx 10^{-4}$ Ф, напряжение ФПН $U_{\Phi ПН} \approx 500$ В, индуктивность цепи заряда конденсатора $L_1 \approx 10^{-4}$ Гн, ее добротность $Q_1 \approx 30$ и сопротивление $R_1 \approx 0,033$ Ом, индуктивность и активное сопротивление цепи разряда конденсатора $L_2 \approx 5 \cdot 10^{-6}$ Гн и $R_2 \approx 0,02$ Ом.

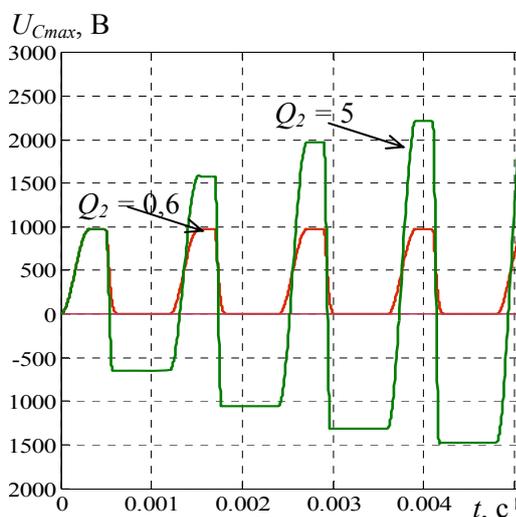


Рис. 2

Моделирование переходных процессов в схеме на рис. 1 при отключенном тиристоре VT_3 и нулевом начальном напряжении на конденсаторе проводилось с применением прикладных программ MATLAB/SIMULINK.

На рис. 2 показаны осциллограммы напряжения на конденсаторе при значениях добротности разрядной цепи: $Q_2 = 0,6$ (при $R_n = 0,363$ Ом) и $Q_2 = 5$ (при $R_n = 0,035$ Ом). Видно, что при невысокой добротности цепи ($Q_2 = 0,6$), когда разряд конденсатора близок к апериодическому процессу с малым перезарядом до отрицательного напряжения, напряжение заряда конденсатора $U_{Cmax} \approx \text{const}$. Однако при достаточно высокой добротности разрядной цепи ($Q_2 = 5$) конденсатор перезарядается до значительных отрицатель-

ных напряжений, а U_{Cmax} возрастает от цикла к циклу и достигает установившейся величины, которая более, чем в пять раз превышает напряжение ФПН.

В табл. 1 отражены результаты зависимости напряжения заряда конденсатора U_{Cmax} и средней импульсной мощности в нагрузке P_{cpn} от добротности разрядной цепи Q_2 , а также изменение коэффициента использования энергии конденсатора $k_{испC}$ и КПД разрядной цепи η_2 при изменении добротности Q_2 от 0,6 до 7.

Таблица 1

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

ности $Q_2 > 5$. При увеличении Q_2 от 5 до 7 значение P_{cpn} уменьшится в $\approx 1,5$ раза. В то же время при увеличении значений Q_2 от 0,6 до 7 максимальное напряжение заряда конденсатора U_{Cmax} монотонно увеличивается примерно в 3,6 раза. Указанные зависимости можно объяснить тем, что при увеличении Q_2 КПД разрядного контура η_2 снижается в 2,5 раза, а коэффициент использования энергии конденсатора $k_{испC}$ – в 3 раза.

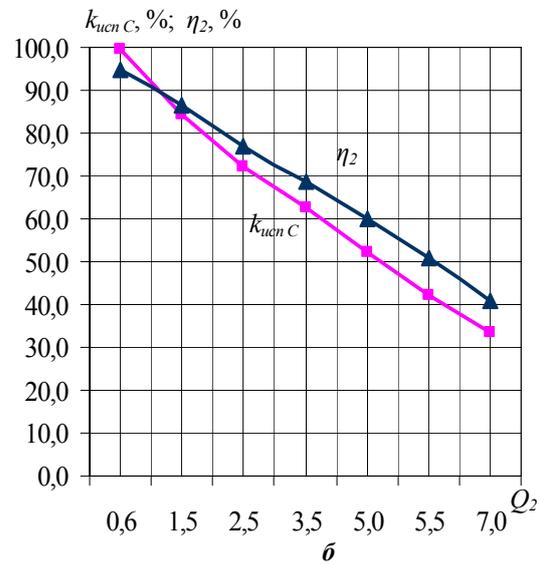
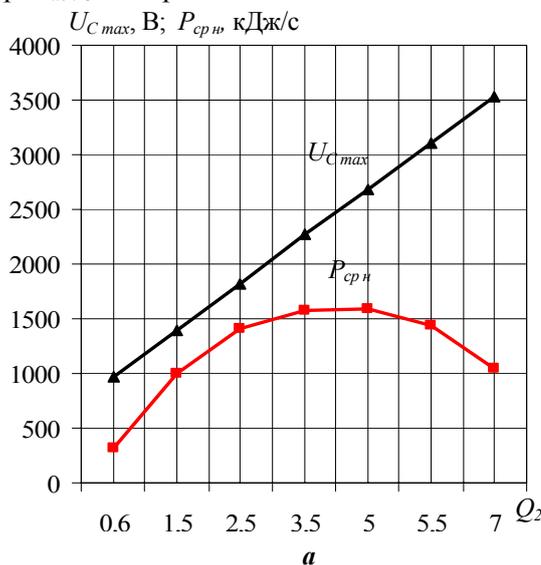


Рис. 3

Проведенный параметрический синтез показал, что наиболее оптимальным является изменение добротности Q_2 от 1,5 до 2,5. При этом напряжение заряда конденсатора U_{Cmax} ограничено значениями $1,5 - 3,2 U_{ФПН}$, а импульсная мощность в нагрузке P_{cpn} увеличивается примерно в 3 раза (по сравнению с режимами без обратной связи) при достаточно высоких КПД разрядной цепи $\eta_2 \approx 77-87\%$ и коэффициенте использования энергии конденсатора $k_{испC} \approx 75-89\%$.

В табл. 2 представлены результаты исследований зависимости от добротности Q_2 величин средней импульсной мощности в нагрузке за время нарастания разрядного тока от 0 до максимального значения I_{max} ($P_{cpn} \uparrow$) и за время уменьшения тока от I_{max} до нуля ($P_{cpn} \downarrow$). Стрелкой вверх обозна-

чены исследуемые параметры при нарастании разрядного тока от 0 до I_{max} , а стрелкой вниз – при уменьшении тока от I_{max} до 0.

Таблица 2

Q_2	0,6	1,5	2,5	3,5	5	5,5	7
W_n , Дж	44,9	75,1	100,7	111,7	112,7	102,4	74,3
$\tau_{разр\uparrow}$, 10^{-6} с	23,2	28,8	30,6	32,4	32,7	33,1	33,7
$P_{ср\ n\ \uparrow}$, кДж/с	1932,4	2604,8	3290,5	3452,0	3446,5	3092,8	2205,2
$\tau_{разр\downarrow}$, 10^{-6} с	115,3	46,0	41,3	38,9	38,3	37,8	37,1
$P_{ср\ n\ \downarrow}$, кДж/с	389,4	1631,3	2438,0	2871,8	2945,6	2709,6	2003,5

Так, при $Q_2 = 1,5$ значение $P_{ср\ n\ \uparrow}$ превышает $P_{ср\ n\ \downarrow}$ в 1,37 раза, а при $Q_2 = 7$ – только в 1,09 раза.

Таким образом, проведенный параметрический синтез электрических цепей двухконтурного ФРИ с накопительным конденсатором показывает широкие возможности повышения импульсной мощности в нагрузке. Но в то же время выбранная схема ФРИ имеет нерегулируемую положительную обратную связь 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 . Этот недостаток может быть устранен при синтезе трехконтурных ФРИ с регулируемой отрицательной и положительной обратной связью величины напряжения его заряда с величиной остаточного на нем напряжения при предыдущем разряде.

Синтез цепей ФРИ с регулируемой обратной связью по напряжению. Трехконтурная электрическая цепь ФРИ с регулируемой обратной связью по напряжению показана на рис. 1. В нее входят: контур заряда конденсатора от 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} увеличится, что приведет к уменьшению напряжения конденсатора при его последующем заряде. Снижение напряжения заряда 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, величина напряжения последующего заряда конденсатора увеличится, что вызовет уменьшение активного сопротивления нагрузки и увеличение остаточного напряжения на конденсаторе при его последующем разряде.

При параметрическом синтезе трехконтурных электрических цепей ФРИ с регулируемой обратной связью по напряжению целевая функция, критерии оптимизации и параметры элементов электрической схемы выбирались такими же, как и при синтезе двухконтурных цепей ФРИ с нерегулируемой обратной связью по напряжению.

На рис. 5 показана временная последовательность подведения управляющих импульсов на включение тиристорных коммутаторов $VT_1 - VT_3$ в схеме на рис. 1. 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. 6 – осциллограммы напряжения на конденсаторе при добротности разрядной цепи $Q_2 = 1,5$ (соответственно при $R_n = 0,13$ Ом). Период повторения управляющих сигналов для всех тиристорных коммутаторов (VT_1 , VT_2 и VT_3) задавался одинаковым, равным 1200 мкс.

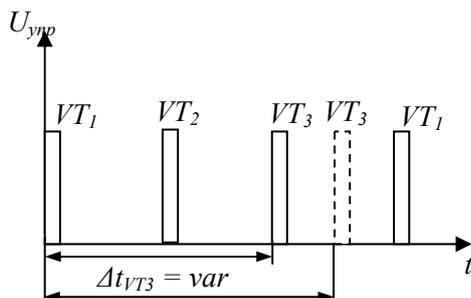


Рис. 5

Эти зависимости показаны также на рис. 4. Из табл. 2 и рис. 4 видно, что форма кривой изменения средней импульсной мощности $P_{ср\ n\ \uparrow}$ за время нарастания разрядного тока в нагрузке аналогична форме кривой $P_{ср\ n\ \downarrow}$ за время его убывания. Но значения $P_{ср\ n\ \uparrow}$ в 1,1–4,9 раз превышают значения $P_{ср\ n\ \downarrow}$, причем, чем меньше добротность Q_2 , тем больше это превышение.

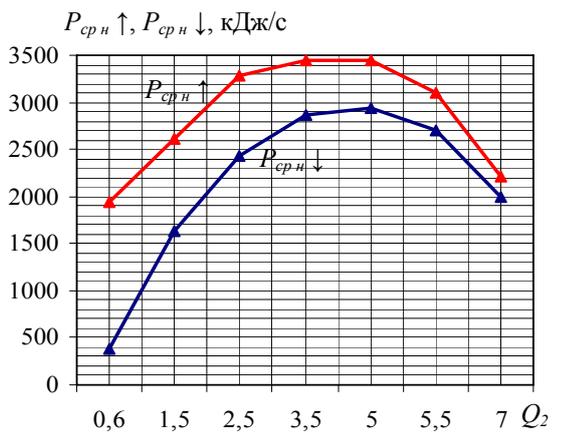


Рис. 4

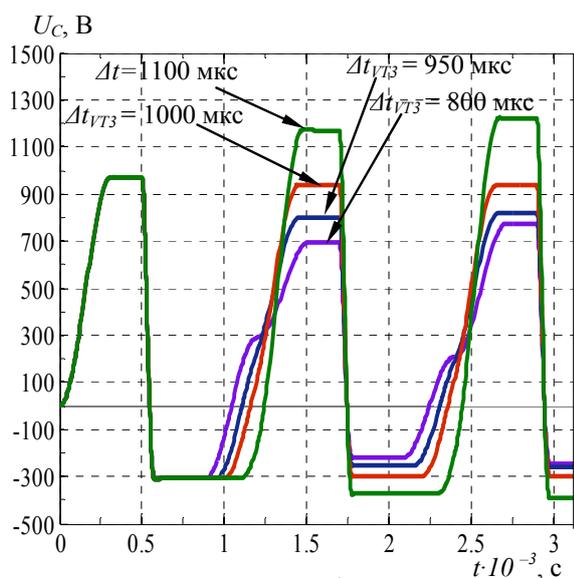


Рис. 6

максимального ($U_{Cзар max}$) и минимального ($U_{Cзар min}$) напряжений заряда конденсатора при изменении добротности разрядной цепи Q_2 от 0,6 до 7.

Был проведен анализ влияния величины Δt_{VT3} на такие энергетические параметры цепей, как средняя импульсная мощность в нагрузке $P_{срн}$, коэффициент использования энергии конденсатора $k_{исп C}$ и КПД разрядной цепи η_2 при добротностях разрядного контура Q_2 от 0,6 до 7.

Таблица 3

	$\Delta t_{VT3}, 10^{-3} \text{ с}$	$U_{Cзар}, \text{ В}$	$P_{срн}, 10^3 \text{ Дж / с}$	$k_{исп C}, \%$	$\eta_2, \%$
$Q_2 = 0,6$ $R_H = 0,363 \text{ Ом}$	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

Из рис. 6 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.

Определены зависимости напряжения заряда конденсатора $U_{Cзар}$ от временной паузы Δt_{VT3} , изменяемой от 800 до 1100 мкс, и добротности разрядной цепи Q_2 , увеличивающейся от 0,6 до 7 за счет уменьшения сопротивления R_H , при неизменном сопротивлении R_2 . Исследовано влияние временной паузы Δt_{VT3} и добротности Q_2 на изменение напряжения $U_{Cзар}$ от минимального $U_{C min}$ до максимального $U_{C max}$ значения.

На рис. 7 показаны диапазоны изменения

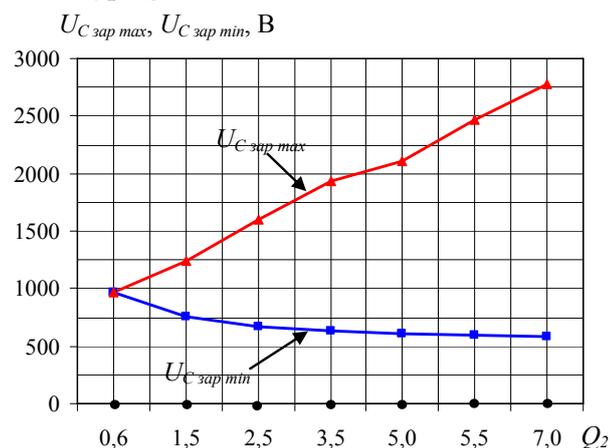


Рис. 7

Анализ результатов, приведенных в табл. 3 и на рис. 7, 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.

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

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

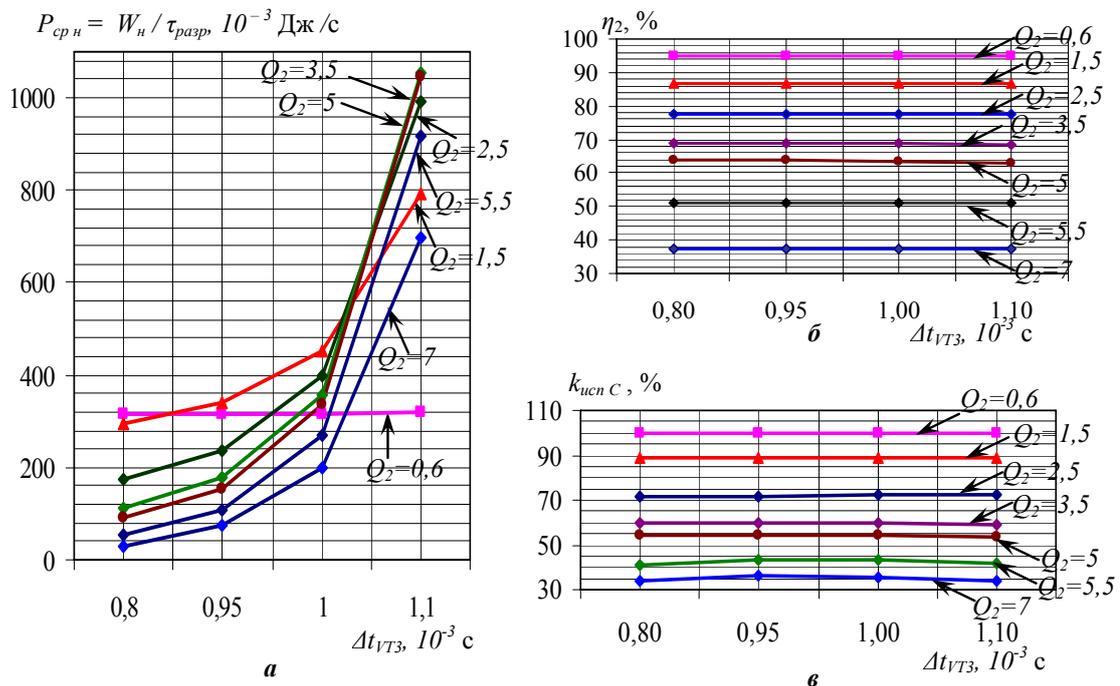


Рис. 8

Анализ энергетических параметров, приведенных в табл. 3 и на рис. 8, показывает, что значения $k_{испс}$ 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 $P_{срн}$ в нагрузке. При этом необходимо учитывать, что значения $P_{срн}$, 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 $P_{срн}$).

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.

Также были исследованы зависимости от добротности Q_2 величины средней импульсной мощности в нагрузке при нарастании в ней разрядного тока от 0 до максимального значения I_{max} ($P_{срн} \uparrow$) и дальнейшем убывании тока от I_{max} до нуля ($P_{срн} \downarrow$) при изменении значений длительности паузы Δt_{VT3} . Результаты исследований приведены в табл. 4 и на рис. 9.

Анализ полученных данных показывает, что для всех значений добротности разрядной цепи Q_2 величины средней импульсной мощности в нагрузке при нарастании в ней разрядного тока от 0 до максимального значения I_{max} ($P_{срн} \uparrow$) больше, чем при убывании тока от I_{max} до нуля ($P_{срн} \downarrow$). Причем с ростом добротности Q_2 разница между этими мощностями становится все меньше. Так при добротности $Q_2 = 0,6$ мощность $P_{срн} \uparrow$ в 1,62

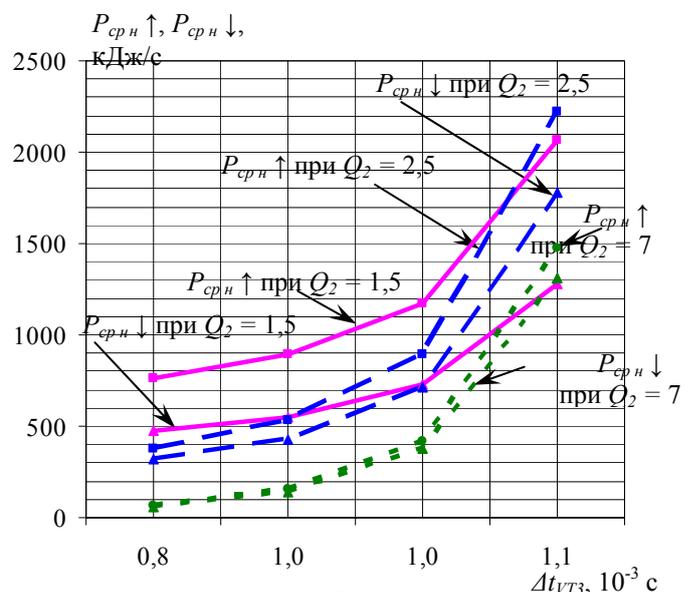


Рис. 9

Таблица 4

	$\Delta t_{VT3},$ 10^{-3} с	$W_n,$ Дж	$\tau_{разр}\uparrow,$ 10^{-6} с	$P_{ср\ n}\uparrow,$ кДж/с	$\tau_{разр}\downarrow,$ 10^{-6} с	$P_{ср\ n}\downarrow,$ кДж/с
$Q_2 = 0,6$ ($R_n = 0,363$ Ом)	0,8	44,4	23,6	1878	115,9	383
	0,95	44,4	23,6	1879	116,6	381
	1	44,4	23,6	1879	116,6	381
	1,1	44,7	23,6	1891	116,2	385
$Q_2 = 1,5$ ($R_n = 0,129$ Ом)	0,8	22,0	28,7	766	46,3	474
	0,95	25,5	28,7	891	46,4	551
	1	33,7	28,7	1175	46,3	726
	1,1	59,2	28,7	2064	46,3	1277
$Q_2 = 2,5$ ($R_n = 0,069$ Ом)	0,8	12,4	32,8	379	39,3	316
	0,95	17,0	32,1	529	40,1	423
	1	28,7	32,0	896	40,1	716
	1,1	71,3	32,1	2218	40,0	1781
$Q_2 = 3,5$ ($R_n = 0,044$ Ом)	0,8	8,1	32,6	247	38,8	208
	0,95	12,7	32,6	389	38,8	327
	1	25,5	32,6	782	38,8	658
	1,1	75,0	32,6	2297	38,8	1932
$Q_2 = 5$ ($R_n = 0,035$ Ом)	0,8	6,4	32,9	195	38,5	166
	0,95	10,9	32,9	333	38,3	286
	1	23,8	32,9	723	38,5	618
	1,1	74,0	32,9	2252	38,4	1926
$Q_2 = 5,5$ ($R_n = 0,021$ Ом)	0,8	3,7	33,2	111	37,8	98
	0,95	7,7	33,2	232	37,8	203
	1	19,2	33,2	578	37,8	508
	1,1	64,8	33,2	1952	37,8	1715
$Q_2 = 7$ ($R_n = 0,012$ Ом)	0,8	2,1	33,4	64	37,4	57
	0,95	5,2	33,4	155	37,4	138
	1	14,1	33,4	421	37,4	376
	1,1	49,2	33,4	1473	37,4	1315

раза больше, чем $P_{ср\ n} \downarrow$, тогда как при $Q_2 = 7$ $P_{ср\ n} \uparrow$ превышает $P_{ср\ n} \downarrow$ в 1,12 раза.

В результате алгоритмического и параметрического синтеза цепей трехконтурного тиристорного ФРИ с регулируемой обратной связью по напряжению установлено, что добротность разрядной цепи Q_2 можно изменять 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 среднюю импульсную мощность в нагрузке $P_{ср\ n}$ при КПД разрядной цепи $\eta_2 \approx 77-87\%$ и $k_{исп\ c} \approx 75-89\%$.

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. Синтез двухконтурных цепей накопительного конденсатора тиристорных ФРИ с положительной обратной связью по напряжению показал, что использование такой связи позволяет осуществлять повышение 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. Алгоритмический и параметрический синтез трехконтурных цепей тиристорного формирователя разрядных импульсов с накопительным конденсатором обосновал возможность повышения средней импульсной мощности в нагрузке $P_{ср\ n}$ с учетом ограничений, определяемых реализацией регулируемых отрицательной и положительной обратных связей по напряжению.

3. 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 целесообразно изменять от 1,5 до 2,5. При этом напряжение заряда конденсатора $U_{зар}$ можно регулировать от $1,5 U_{ФПН}$ до $3,2 U_{ФПН}$, а среднюю импульсную мощность в нагрузке $P_{ср\ n}$ можно увеличивать примерно 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 $k_{исп\ c} \approx 75-89\%$.

4. В трехконтурном тиристорном формирователе разрядных импульсов с регулируемой обратной связью по напряжению такая обратная связь за счет изменения паузы Δt_{VT3} позволяет осуществлять широкодиапазонное регулирование напряжения заряда конденсатора $U_{C\ max}$, не превышая значений, допустимых для современных тиристорных коммутаторов.

1. Богуславский Л.З. О возможности синтеза наноуглерода при высокочастотном импульсно-периодическом электроразрядном воздействии на газообразные углеводороды // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 4. – С. 73–82.

2. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.

3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: Том 1. – С-Пб.: Питер, 2009. – 512 с.

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

5. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии // Электротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 1. – С. 70–75.

6. Кузнецов А.М. Синтез параметров и допусков элементов электрических цепей // Сб. научн тр. "Синтез, анализ и диагностика электронных цепей". – 2012. – Вып. 10. – С. 3–13.
7. Супруновская Н.И. Метод формирования мощных разрядных импульсов с повышенной скоростью нарастания токов в нагрузке // Техн. электродинамика. – 2012. – № 2. – С. 109–110.
8. 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.
9. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
10. Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Развитие метода разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки // Техн. электродинамика. – 2013. – № 3. – С. 3–12.
11. 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.

УДК 621.3.011:621.372

СИНТЕЗ ЭЛЕКТРИЧНИХ КІЛ З ЄМНІСНИМИ НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ФОРМУВАЧАХ ПОТУЖНИХ РОЗРЯДНИХ ІМПУЛЬСІВ

А.А.Щерба, чл.-кор. НАН України, Н.І.Супруновська, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: iednat1@gmail.com

Виконано структурно-параметричний синтез дво- та триконтурних електричних кіл з ємнісним накопичувачем енергії (СНЕ) у тиристорних формувачах розрядних імпульсів (ФРІ) для живлення технологічного навантаження, електричний опір R_n якого залежить від напруги заряду СНЕ й стохастично змінюється від розряду до розряду. Цільовою функцією синтезу обрано підвищення середньої імпульсної потужності в навантаженні, а критеріями оптимізації - величину напруги заряду конденсатора, коефіцієнт використання його енергії й ККД розрядного кола СНЕ. Враховувалися енергетичні й динамічні обмеження, що накладаються на цільову функцію й параметри елементів кіл. Бібл. 11, рис. 9, табл. 4.

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

SYNTHESIS OF ELECTRICAL CIRCUITS WITH CAPACITIVE ENERGY STORAGES IN SEMICONDUCTOR FORMERS OF POWER DISCHARGE PULSES

A.A.Shcherba, N.I.Suprunovska

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine, e-mail: iednat1@gmail.com

It is performed the structure-parametric synthesis of the two-circuit and three-circuit electrical circuits with capacitive energy storage (CES) in the thyristor discharge pulse former (DPF) for supply of technological load, which electrical resistance depends on CES charge voltage and changes from one discharge to another stochastically. The discharge pulse former under consideration is realized both positive back coupling of charge voltage of reservoir capacitor from residual voltage its previous discharge and a negative one. 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 reservoir capacitor. The optimal parameters of elements of two-circuit and three-circuit capacitive energy storage circuits at which the maximum average pulse power in the load is attained are defined. The power and dynamic restrictions on objective function and circuit element parameters were taken into account. References 11, figures 9, tables 4.

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

1. Boguslavskii L.Z. About possibility of nano-carbon synthesis at high-frequency repetitive discharge pulses action on gaseous hydrocarbons // Elektronnaia obrabotka materialov. – 2010. – № 4. – Pp. 73–82. (Rus)

2. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of capacitive non-linear- parametrical energy sources for discharge-pulse technologies // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho Universytetu Korablebuduvannia. – 2010. – № 4. – Pp. 118–124. (Rus)

3. Demirchian K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. Electrical engineering theory. Vol. 1. – Sankt-Peterburg: Piter, 2009. – 512 p. (Rus)

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

5. Kravchenko V.I., Petkov A.A. Parametrical synthesis of high-voltage pulse test device with capacitive energy storage // Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2007. – № 1. – Pp. 70–75. (Rus)

6. Kuznetsov A.M. Synthesis of parameters and tolerances of electrical circuit elements // Zbirnyk naukovykh prats "Syntez, analis i diagnostika elektronnykh tsepei" – 2012. – Issue 10. – Pp. 3–13. (Rus)

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

8. Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Suprunovskaia N.I. Power processes in the electropulse installations with capacitive energy storages. – Kyiv: Intercontinental-Ukraine, 2009. – 208 p. (Rus)

9. Shtoyer R. Multicriteria optimization. Theory, calculation and application. – Moskva: Radio i sviaz, 1992. – 504 p. (Rus)

10. Shcherba A.A., Ivashchenko D.S., Suprunovskaia N.I. Development of difference equations method for analysis of transient processes in the circuits of electro-discharge systems at stochastic changing of load resistance // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – № 3. – Pp. 3–12. (Rus)

11. Shcherba A.A., Suprunovskaia N.I. Increasing regularities of rate of current rise in the load at limiting its maximal values // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – № 5. – Pp. 3–9. (Rus)

Надійшла 05.06.2013

Received 05.06.2013