

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ СИСТЕМ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СРЕД

С.Н. Захарченко, докт.техн.наук, Ю.В. Руденко, канд.техн.наук, А.П. Черкасский
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.
E-mail: snzakhar@bk.ru, rudenko@ied.org.ua, cherkassky_a@ukr.net

Проанализированы методы повышения точности регулирования напряжения емкостных накопителей энергии и варианты их технической реализации. Приведены модели узлов зарядного устройства генератора разрядных импульсов установки плазмоэрозионной обработки гетерогенных токопроводящих сред и рассчитаны переходные процессы в них. Для идеального зарядного LC-контура найдена зависимость погрешности регулирования напряжения емкостного накопителя от его волнового сопротивления и отношения начальных условий на его элементах. Предложены алгоритмы управления порогом ограничения зарядного тока, обеспечивающие высокую точность регулирования напряжения емкостных накопителей при высокой скорости их заряда. Показано, что использование режимов, в которых частота следования импульсов заряда емкостных накопителей на порядки выше частоты следования разрядных импульсов, позволяет уменьшить погрешность регулирования напряжения на них до $\pm(1\div3)\%$ и менее. Библиограф. 21, рис. 6.

Ключевые слова: точность регулирования напряжения, емкостной накопитель энергии, зарядный контур, волновое сопротивление, переходной процесс, начальные условия.

Введение. Точность регулирования напряжения заряда емкостных накопителей энергии (ЕНЭ) во многом определяет как качество стабилизации напряжения импульсных источников питания [2, 5, 8, 9, 11], так и девиацию параметров разрядных импульсов генераторов, работающих на технологические нагрузки и, как следствие, разброс параметров переходных процессов в них и свойств получаемой продукции [1, 3, 4, 10, 11, 13-21]. Генераторы разрядных импульсов с зарядом ЕНЭ от источника регулируемого постоянного напряжения с помощью не полностью управляемых вентилей [12] и цепей ограничения тока зарекомендовали себя как простые и надежные устройства, способные обеспечить значительную мощность при высоком коэффициенте полезного действия для широкого класса технологических нагрузок [10, 11, 13-21]. Однако точность регулирования и стабилизации напряжения на ЕНЭ генераторов импульсов, построенных по такому принципу при работе на нелинейную технологическую нагрузку, сопротивление которой может изменяться стохастически в широких пределах [6], невысока, поскольку зависит от оперативности и точности регулирования напряжения источника питания, от которого осуществляется ЕНЭ, а также от начальных условий на самом накопителе, существенное влияние на которые, в свою очередь, оказывают переходные процессы в нагрузке, протекающие перед его зарядом [13, 14, 16].

Нестабильность напряжения заряда ЕНЭ таких генераторов существенно возрастает, если частота следования разрядных импульсов превышает частоту пульсаций выпрямленного напряжения сети, которым заряжается опорная емкость источника регулируемого постоянного напряжения. При указанном соотношении данных частот в таких генераторах оперативное регулирование напряжения ЕНЭ возможно только в следующем периоде за счет коммутации перезарядных цепей накопителя [7, 13], однако, точность такого регулирования крайне низкая [16]. Существенно повысить точность стабилизации и импульсного регулирования напряжения ЕНЭ можно, если частота следования зарядных импульсов будет на порядки превосходить частоту следования разрядных импульсов. Кроме того, использование в зарядных цепях полностью управляемых ключей позволяет дополнительно повысить точность регулирования напряжения за счет регулирования длительности последнего зарядного импульса в каждой их серии [7, 14, 15]. Кроме особенностей цепей обратной связи по напряжению и алгоритма их функционирования, точность регулирования напряжения в таких устройствах будет определяться постоянством соотношений реактивных параметров дросселя, ограничивающего заряд-

ный ток и ЕНЭ, а также начальных условий в них, поскольку энергия, запасенная в индуктивном элементе в момент размыкания ключа преобразователя при достижении установленного верхнего порога напряжения накопителя переходит в энергию ЕНЭ за вычетом незначительных потерь в силовых цепях. **Целью** настоящей работы является дальнейшее развитие теории зарядных устройств емкостных накопителей с высокочастотным преобразованием энергии в направлении повышения точности регулирования их напряжения и установления ее корреляции с отношениями реактивных параметров элементов зарядного контура и начальных условий на них.

Переходные процессы в зарядном устройстве с широтно-импульсной модуляцией тока и релейным регулированием напряжения рассмотрим на примере зарядного устройства (ЗУ) генератора разрядных импульсов экспериментальной технологической установки очистки поверхностных вод методом плазмозеронозной коагуляции, разработанного и изготовленного авторами в рамках конкурсной тематики [7]. Упрощенная функциональная схема его силовой части показана на рис. 1. ЗУ питается от однофазного неуправляемого выпрямителя с C -фильтром и устройством пуска, представленного на рис. 1 источником напряжения U_d . Биполярные транзисторы с изолированным затвором $VT1-VT4$ и обратные диоды $VD1-VD4$ представляют собой силовую часть высокочастотного однофазного мостового инвертора напряжения. Высокочастотный трансформатор $TV1$ осуществляет гальваническую развязку ЕНЭ (C на рис. 1) от питающей сети и согласование уровней напряжения на нем с уровнем напряжения на выходе мостового инвертора. Диоды $VD5-VD8$ представляют собой высокочастотный однофазный мостовой выпрямитель инвертированного напряжения. Высокочастотный дроссель L выполняет функцию ограничения зарядного тока, а нулевой диод $VD9$ обеспечивает протекание тока дросселя с минимальными потерями при передаче его энергии в ЕНЭ в моменты времени, когда напряжение на выходе трансформатора $TV1$ отсутствует. Система управления зарядным устройством (СУЗУ) управляет мостовым инвертором по закону широтно-импульсной модуляции (ШИМ) зарядного тока с ограничением его амплитуды на установленном уровне в соответствии с сигналом датчика тока R_T [7]. Управление напряжением ЕНЭ осуществляется по релейному алгоритму. Детально СУЗУ и алгоритм ее функционирования описаны в [7].

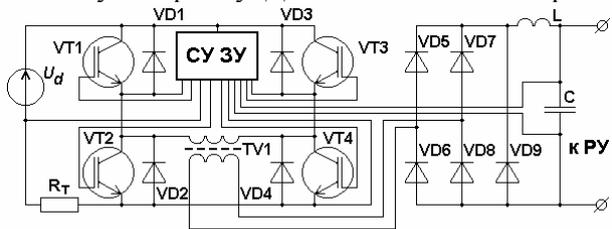


Рис. 1

Особенностью генераторов экспериментальных и лабораторных технологических установок является необходимость регулирования напряжения, длительности и частоты следования разрядных импульсов в широких диапазонах, что необходимо для поиска оптимальных технологических режимов. Как следствие, емкость батареи конденсаторов C регулируется в широком диапазоне (в нашем случае от 10 до 330 мкФ) их коммутацией механическими переключателями.

Напряжение заряда накопителя U_C регулируется в диапазоне от 20 до 600 В, а частота следования разрядных импульсов f – от 0,1 до 2000 Гц. Для таких генераторов крайне важно обеспечить отсутствие перерегулирования напряжения на батарее рабочих конденсаторов C при малых значениях её емкости и при этом не допустить существенного снижения средней мощности, т.е. среднего тока заряда. Эти два условия находятся в антагонизме, поскольку повышение точности регулирования напряжения заряда за счет минимизации напряжения перезаряда требует уменьшения энергии, запасенной в токоограничивающем дросселе L , а, следовательно, и зарядного тока, а обеспечение значительной выходной мощности, напротив, требует увеличения зарядного тока, особенно, при низких значениях напряжения конденсатора C , что обеспечивает высокую скорость увеличения его заряда $\Delta q_C / \Delta t$.

Упрощенная OrCad-модель, адекватно воспроизводящая переходной процесс в выходном LC -контуре ЗУ рис. 1, показана на рис. 2 [7]. Частота коммутации транзистора $VT1$ на рис. 2 равна удвоенной частоте коммутации транзисторов $VT1-VT4$ инвертора напряжения на рис. 1. Транзистор $VT1$ в соответствии с напряжением управления U_V осуществляет широтно-импульсную модуляцию зарядного тока I_L аналогично инвертору $VT1-VT4$ на рис. 1. На рис. 2 ограничивающий зарядный ток i_L дроссель L и накопитель энергии C полностью соответствуют аналогичным дросселю и конденсатору на рис. 1, диод $VD1$ – диоду $VD9$; источник напряжения U_{BX} – приведенному ко вторичной обмотке трансформатора $TV1$ источнику напряжения U_d на рис. 1. Резистивные датчики токов транзистора $VT1$ – i_{ex} и дросселя L – i_L обозначены R_{Si} и R_{SL} соответственно. Резистор R_d необходим для разряда ЕНЭ с целью демонстрации релейного алгоритма стабилизации напряжения на нем.

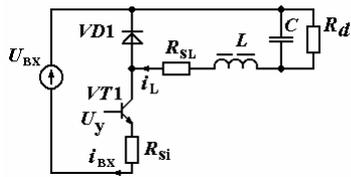


Рис. 2

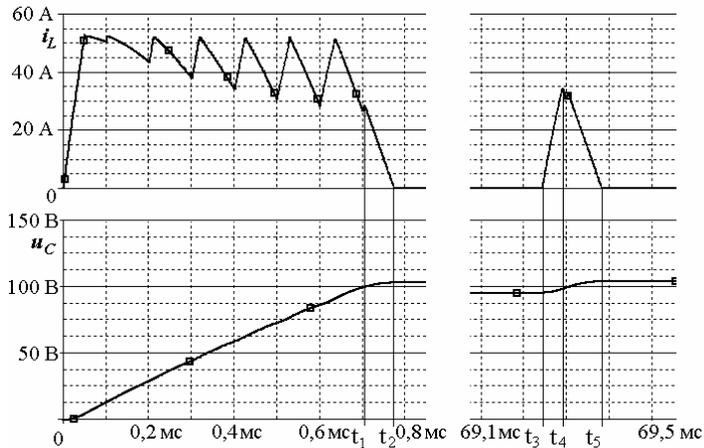


Рис. 3

интервале времени при закрытом транзисторе $VT1$ примет вид рис. 4.

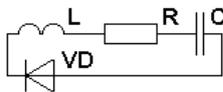


Рис. 4

Как следует из анализа переходных процессов в цепи рис. 4, энергия $W_L = 0,5Li_L^2|_{t_1}$, запасенная в дросселе L к моменту времени t_1 , рассеивается в виде тепловой энергии в резисторе R , который моделирует суммарные потери в контуре, и расходуется на излишний «дозаряд» конденсатора C . В рассмотренном конкретном случае (рис. 3) к моменту спада тока дросселя i_L до нуля ($t_2 \approx 0,77$ мс) напряжение на конденсаторе составило $u_C|_{t_2} \approx 103,5$ В, а величина излишнего «дозаряда» конденсатора $\Delta u_C|_{t_2} = u_C|_{t_2} - U_{C0}$ – около 3,5 В, т.е. $\delta u_C|_{t_2} = 100\% \cdot \Delta u_C|_{t_2} / U_{C0} \approx 3,5\%$ от заданного значения $U_{C0} = 100$ В.

В момент времени $t_3 \approx 69,25$ мс (рис. 3) вследствие разряда конденсатора C через резистор R_d напряжение на нем падает и становится меньше нижнего порога релейного ограничения $U_{Cmin} = 97$ В, после чего СУЗУ открывает транзистор $VT1$ (рис. 2), что приводит к появлению импульса зарядного тока. В момент времени $t_4 \approx 69,3$ мс напряжение на конденсаторе достигает заданного значения верхнего порога релейного ограничения $U_{C0} = 100$ В (рис. 3), и СУЗУ, как и в момент времени t_1 , запирает транзистор $VT1$. Зарядный ток в момент времени t_4 составляет $i_L|_{t_4} \approx 33$ А, обуславливая энергию дросселя L , которая дополнительно передается в конденсатор C и приводит к его излишнему «дозаряду» к моменту времени $t_5 \approx 69,37$ мс на величину $\Delta u_C|_{t_5} \approx 4,5$ В, т.е. $\delta u_C|_{t_5} \approx 4,5\%$.

Как видно из приведенного примера, рассмотренная двухконтурная система автоматического регулирования напряжения на конденсаторе, состоящая из внутреннего контура регулирования тока и внешнего контура регулирования напряжения [7], не обеспечивает одно и то же значение зарядного тока во все моменты запираения транзистора $VT1$. Это приводит к тому, что значение энергии, запасенной в дросселе L к моменту запираения $VT1$, есть величина случайная, принимающая значение в диапазоне от 0 до $W_{Lm} = 0,5LI_{Lm}^2$. Поэтому она и не может быть однозначно учтена с помощью постоянной аддитивной погрешности регулирования напряжения заряда конденсатора. Отметим, что описанные выше двухконтурные системы автоматического регулирования применяются во многих устройствах преобразовательной техники, и повышение точности их регулирования является актуальным и важным.

На рис. 3 показаны синхронные машинограммы зарядного тока i_L и напряжения на конденсаторе u_C , полученные в результате рас-чета переходного процесса в пакете OrCad 9.2 для модели рис. 2 при следующих значениях параметров: частота коммутации $VT1$ $f = 10$ кГц, $L = 250$ мкГн, $C = 300$ мкФ, $R_{Si} = R_{SL} = 0,1$ Ом, $R_d = 2,7$ кОм, порог ограничения тока дросселя $I_{Lm} = 50$ А, верхний и нижний пороги релейного ограничения напряжения конденсатора $U_{C0} = 100$ В и $U_{Cmin} = 97$ В соответственно, напряжение источника питания $U_{BX} = 300$ В.

Как следует из рис. 3, в момент времени $t_1 \approx 0,7$ мс напряжение на конденсаторе C достигает заданного значения верхнего порога релейного ограничения $u_C|_{t_1} = U_{C0} = 100$ В, и СУЗУ выдает сигнал на запираение транзистора $VT1$. При этом ток дросселя L (рис. 3) составляет $i_L|_{t_1} \approx 28,7$ А. Даже при закрытом транзисторе $VT1$ этот ток продолжает протекать по цепи $L-R_{SL}-VDI-C-L$ с ответвлением в резистор R_d , продолжая «дозарядить» конденсатор C . Если на этапе заряда пренебречь наличием резистора R_d (ввиду малого тока в нем по сравнению с током конденсатора C), то схема замещения зарядного контура на

Влияние энергетических процессов в зарядном контуре на точность регулирования напряжения на конденсаторе. Поскольку значение зарядного тока i_L в моменты времени запираания транзистора VTI не является детерминированной величиной, все дальнейшие расчеты будем проводить для наихудшего случая, когда он принимает свое максимально возможное значение I_{Lm} . Если в схеме на рис. 4 пренебречь потерями энергии в резисторе R и диоде VD , что вполне допустимо для инженерных расчетов в реальных устройствах, то уравнение энергетического баланса можно записать

$$W_{Lm} = W_C - W_{C0}, \quad (1)$$

где $W_C = 0,5CU_C^2$ – энергия, запасенная в конденсаторе к моменту полного окончания переходного процесса в цепи; $W_{C0} = 0,5CU_{C0}^2$ – энергия, запасенная в конденсаторе к моменту начала запираания транзистора VTI .

Обозначим для рассматриваемого наихудшего случая абсолютную величину напряжения излишнего «дозаряда» конденсатора $\Delta U_C = U_C - U_{C0}$, а его относительную величину $\delta U_C = 100\% \cdot \Delta U_C / U_{C0}$ и запишем (1) в виде

$$\Delta U_C^2 + 2U_{C0}\Delta U_C - I_{Lm}^2 L/C = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) имеет два действительных корня, один из которых всегда положителен, а второй – всегда отрицателен. Первый корень уравнения (2) отражает случай, когда напряжение на конденсаторе C и ЭДС самоиндукции дросселя L направлены встречно, что справедливо для реальной ситуации в цепи рис. 4

$$\Delta U_{C1} = U_{C0} \left(\sqrt{1 + L \cdot I_{Lm}^2 / (C \cdot U_{C0}^2)} - 1 \right). \quad (3)$$

Второй корень уравнения (2) $\Delta U_{C2} = -U_{C0} \left(1 + \sqrt{1 + L \cdot I_{Lm}^2 / (C \cdot U_{C0}^2)} \right)$ соответствует случаю, когда напряжение на конденсаторе C и ЭДС самоиндукции дросселя L направлены в одну сторону. Такая ситуация могла бы возникнуть в следующем полупериоде колебаний в LC -контуре, если бы он не содержал диод VD . Поскольку для цепи с диодом (рис. 4) верным является только первый корень, в дальнейшем будем рассматривать только его, а индекс в обозначении записывать не будем. Разделив выражение (3) на U_{C0} и умножив на 100%, перейдем к относительным величинам

$$\delta U_C = 100\% \cdot \left(\sqrt{1 + L \cdot I_{Lm}^2 / (C \cdot U_{C0}^2)} - 1 \right). \quad (4)$$

Обозначим волновое сопротивление зарядного контура $\rho = \sqrt{L/C}$, а отношение заданных уровней тока дросселя и напряжения на конденсаторе (начальных условий на них) $g = I_{Lm}/U_{C0}$, перепишем (4) в виде

$$\delta U_C = 100\% \cdot \left(\sqrt{1 + (\rho \cdot g)^2} - 1 \right). \quad (5)$$

На рис. 5 показан график зависимости (5), из анализа которого следует, что для обеспечения погрешности регулирования напряжения заряда конденсатора не более 10% волновое сопротивление зарядного контура не должно превышать 0,9 Ом, а соотношение начальных условий на его реактивных элементах – $I_{Lm}/U_{C0} \leq 0,5$ См. Заметим, что существенное уменьшение волнового сопротивления зарядного контура, во-первых, повышает скорость нарастания тока в нем, поэтому ограничивается быстродействием внутреннего контура управления по току СУЗУ, а во-вторых, приводит к уменьшению добротности реального зарядного контура, в котором есть потери, а, следовательно, и КПД процесса заряда конденсатора. Исходя из сказанного выше, для рассматриваемого класса устройств волновое сопротивление зарядного контура рекомендуется в диапазоне от 0,4 до 0,9 Ом. Значительно уменьшить погрешность регулирования напряжения конденсатора в таких устройствах можно, снизив отношение начальных условий на реактивных элементах зарядного контура g до уров-

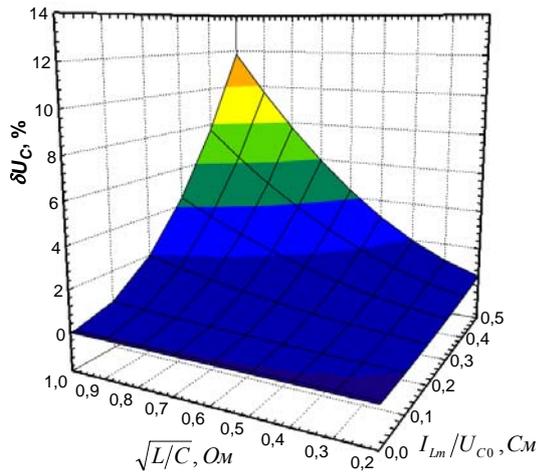


Рис. 5

шения I_{Lm} в момент времени, когда Δu_C снизится до заданного значения. В рассматриваемом устройстве нами был применен второй способ ввиду простоты его технической реализации.

На рис. 6 а и б представлены максимально возможные значения относительных погрешностей регулирования напряжения конденсатора δU_C в зависимости от его заданного уровня U_{C0} для разных значений емкости C при ограничении зарядного тока I_{Lm} значениями 50 и 5 А соответственно. Данные получены при $L=250$ мкГн, $U_{BX}=300$ В, $f=10$ кГц в результате численного расчета переходных процессов в модели на рис. 2.

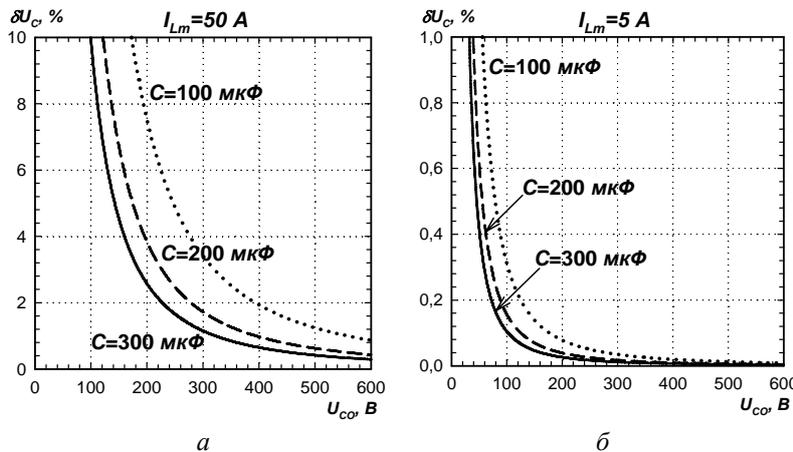


Рис. 6

не превышала 1%.

Погрешность релейного регулирования напряжения на емкостных накопителях энергии в рассмотренных системах, как правило, не превышает $\pm(1\div 3)\%$ (рис. 3) и может быть уменьшена за счет оптимизации алгоритмов работы и параметров СУЗУ. Как следует из рис. 6, погрешность регулирования напряжения, обусловленная излишним «дозарядом» конденсатора, при неправильном выборе волнового сопротивления зарядного контура и начальных условий на его реактивных элементах может достигать 10% и более (рис. 6, а). Однако правильный выбор этих параметров в результате анализа рис. 5 позволяет уменьшить ее до 1% и менее (рис. 6, б). В этом случае она не будет основной составляющей суммарной погрешности регулирования напряжения конденсатора. Таким образом, использование высокочастотного заряда емкостных накопителей энергии [7, 14, 15], частота которого на порядки выше частоты их разряда, позволяет уменьшить погрешность регулирования напряжения на них до $\pm(1\div 3)\%$ и менее, что на порядок меньше, чем у распространенных сегодня ти-

ня 0,3 См и ниже. Без существенного уменьшения мощности зарядного устройства это возможно только для режимов относительно высоких напряжений на конденсаторе $U_{C0} > 100$ В. В противном случае необходимо уменьшать значения параметров ρ и g к концу процесса заряда.

Уменьшение значения ρ по мере приближения напряжения на конденсаторе к заданному уровню U_{C0} технически реализовать сложно, поскольку это потребует, например, переключения отпаек обмотки дросселя L либо иного метода управления его индуктивностью. Уменьшение параметра g может быть реализовано в рамках СУЗУ либо с помощью введения непрерывной зависимости I_{Lm} от разности текущего напряжения на конденсаторе и его заданного уровня U_{C0} ($I_{Lm} = F(\Delta u_C)$), либо с помощью дискретного умень-

Как следует из анализа рис. 6, увеличение емкости конденсатора C и, особенно, напряжения на нем U_{C0} способствуют снижению погрешности регулирования его напряжения, что полностью согласуется с данными рис. 5. Уменьшение уровня ограничения зарядного тока I_{Lm} с 50 до 5 А позволило в десятки раз уменьшить погрешность регулирования напряжения при заряде конденсатора во всех рассмотренных режимах. При значениях U_{C0} свыше 60 В погрешность регулирования напряжения на конденсаторе емкостью C от 100 мкФ и выше при $I_{Lm}=5$ А в рассмотренных условиях

ристорных зарядных устройств ($\pm 10 \div 20\%$), в которых частота следования зарядных импульсов равна частоте следования разрядных [14, 16].

Выводы. 1. Использование в системах импульсной плазмозероизионной обработки гетерогенных токопроводящих сред высокой частоты следования импульсов заряда емкостных накопителей энергии, которая на порядки выше частоты следования разрядных импульсов, позволяет уменьшить погрешность регулирования напряжения на них до $\pm(1 \div 3)\%$ и менее, а также обеспечивает индифферентность к условиям предыдущего процесса разряда.

2. Для зарядного LC -контура без потерь энергии найдена аналитическая зависимость погрешности регулирования напряжения емкостного накопителя энергии от его волнового сопротивления и отношения начальных условий на его элементах. Определены оптимальные значения диапазонов изменения этих параметров ($\rho \leq 0,5 \text{ Ом}$, $I_{Lm}/U_{C0} \leq 0,5 \text{ См}$), обеспечивающие высокие значения скорости заряда конденсатора ($\Delta q_C/\Delta t \geq 30 \text{ А}$) и точности регулирования напряжения на нем ($\delta U_C \leq 3\%$) в рассмотренных условиях.

3. С целью расширения диапазонов возможного изменения волнового сопротивления зарядного контура (до 1 Ом и выше) при обеспечении высоких значений скорости заряда емкостных накопителей энергии ($\Delta q_C/\Delta t \geq 20 \text{ А}$) и точности регулирования напряжения на них ($\delta U_C \leq 3\%$) предложены алгоритмы непрерывного и дискретного управления порогом ограничения зарядного тока в зависимости от разницы текущего и установленного значений напряжения на емкостном накопителе энергии.

1. Божко І.В., Кобильчак В.В. Джерело живлення для імпульсних електророзрядних технологій обробки води // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 3. – С. 76–82.

2. Болотовский Ю.И., Таназлы Г.И., Вашкевич Е.И., Никитин А.В. Разработка систем заряда емкостных накопителей энергии. Ч.2 // Силовая электроника. – 2009. – № 1. – С. 34–45.

3. Вовченко А.И., Дивак Н.П., Тертилов Р.В. Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 6. – С. 54–60.

4. Волков І.В., Зозульов В.І., Шолох Д.О. Принципи побудови компресійних магніто-напівпровідникових пристроїв для імпульсних технологій та лазерів // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 3. – С. 10–18.

5. Денисов Ю.А., Велигорский А.А. Качество стабилизации напряжения в системах силовой электроники с пропорциональным и пропорционально-интегральным регуляторами // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч. 3. – С. 81–86.

6. Захарченко С.М. Статистичні дослідження еквівалентного електричного опору гетерогенного струмопровідного середовища при його електроерозійній обробці на прикладі гранул алюмінію у воді // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. – № 1 (133). – С. 62–67.

7. Захарченко С.Н., Руденко Ю.В. Сравнительный анализ алгоритмов импульсного заряда емкостных накопителей энергии для систем плазмозероизионной обработки гетерогенных токопроводящих сред // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2014. – Вип. 37. – С. 100–108.

8. Кориунов А. Динамический расчет стабилизированного понижающего преобразователя напряжения постоянного тока // Силовая электроника. – 2005. – № 3. – С. 88–91.

9. Кориунов А. Повышение точности стабилизации выходного напряжения повышающего преобразователя постоянного тока // Силовая электроника. – 2011. – № 9. – С. 118–126.

10. Лопатько К.Г., Мельничук М.Д. Фізика, синтез та біологічна функціональність нанорозмірних об'єктів. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2013. – 297 с.

11. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – Киев: Наукова думка, 1982. – 424 с.

12. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. – К.: Вища Школа. – 1983. – 431 с.

13. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. – К.: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.

14. Щерба А.А., Захарченко С.Н. Полупроводниковые адаптивные системы объемной электроискровой обработки материалов и сред // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електроенергетика. – 1999. – Вип. 2. – С. 66–73.

15. Щерба А.А., Захарченко С.Н. Стабилизация и регулирование параметров разрядных импульсов в системах объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електродинаміка. – 2001. – С. 30–35.

16. Щерба А.А., Захарченко С.М., Супруновська Н.І., Шевченко Н.І., Монастирський Г.Є., Перетятко Ю.В., Петрученко О.В. Стабілізація режимів електротехнологічних систем для отримання іскроерозійних мікро- та нанопорошків // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2006. – Ч. 1. – С. 120–123.
17. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Кучерявая И.Н., Лопатько К.Г., Афтанділянц Е.Г. Анализ методов повышения эффективности электроэрозионной коагуляции при очистке водных сред // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". – 2008. – Ч. 2. – С. 120–125.
18. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: influence of processing parameters // J. Appl. Phys. – 2004. – Vol. 95. – No 3. – Pp. 823–829.
19. Danilenko N.B., Savelev G.G., Yavorovskii N.A., Yurmazova T.A., Galanov A.I., Balukhtin P.V. Composition and Formation Kinetics of Erosion Products of the Metallic Charge in an Electric-Discharge Reactor // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2005. – Vol. 78. – No 9. – Pp. 1438–1443.
20. Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hoffmann M.R., Chang J.-S. Electrohydraulic Discharge and Nonthermal Plasma for Water Treatment // Ind. Eng. Chem. Res. – 2006. – Vol. 45. – Pp. 882–905.
21. Nguyen P.K., Jin S., Berkowitz A.E. Mn-Bi particles with high energy density made by spark erosion // J. Appl. Phys. – 2014. – Vol. 115. – Pp. 17A756-1 – 17A756-3.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ НА ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧАХ ЕНЕРГІЇ СИСТЕМ ІМПУЛЬСНОЇ ПЛАЗМО ЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ ГЕТЕРОГЕННИХ СТРУМОПРОВІДНИХ СЕРЕДОВИЩ

С.М. Захарченко, докт.техн.наук, **Ю.В. Руденко**, канд.техн.наук, **О.П. Черкаський**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,
E-mail: snzakhar@bk.ru, rudenko@ied.org.ua, cherkassky_a@ukr.net

Проаналізовано методи підвищення точності регулювання напруги ємнісних накопичувачів енергії та варіанти їхньої технічної реалізації. Показано моделі вузлів зарядного пристрою генератора розрядних імпульсів установки плазмоерозійної обробки гетерогенних струмопровідних середовищ та обчислено перехідні процеси в них. Для ідеального LC-контур знайдено залежність похибки регулювання напруги ємнісного накопичувача від його хвильового опору та співвідношення початкових умов на його елементах. Запропоновано алгоритми керування граничною величиною зарядного струму, яка забезпечує високу точність регулювання напруги ємнісних накопичувачів при високій швидкості їхнього заряду. Показано, що використання режимів, в яких частота слідування імпульсів заряду ємнісних накопичувачей на порядки вище, ніж частота слідування розрядних імпульсів, дозволяє зменшити похибку регулювання напруги на них до $\pm(1\div3)\%$ та нижче. Бібл 21, рис 6.

Ключові слова: точність регулювання напруги, ємнісний накопичувач енергії, зарядний контур, хвильовий опір, перехідний процес, початкові умови.

IMPROVING THE ACCURACY OF THE VOLTAGE REGULATION IN THE CAPACITIVE ENERGY STORAGE DEVICES FOR PULSE PLASMA-EROSION TREATMENT SYSTEMS OF HETEROGENEOUS CONDUCTIVE MEDIA

S.N. Zakharchenko, Yu.V. Rudenko, A.P. Cherkassky
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.
E-mail: snzakhar@bk.ru, rudenko@ied.org.ua, cherkassky_a@ukr.net

The methods for improving the accuracy of voltage regulation in capacitive energy storage devices and variants of their technical implementation were analyzed. With the use of the proposed models of charging device units of discharge pulse generator for plasma-erosion treatment of heterogeneous conductive media a transients in them were calculated. For the ideal charging LC-circuit the dependency of the of voltage regulation imprecision value in capacitive energy storage device from its characteristic impedance and correlation between the initial conditions on its parts was determined. The algorithms for adjusting the charging current threshold value were developed. Suggested algorithms provide highly accurate voltage regulation in capacitive energy storage devices while those devices are charged with a high speed. It is shown that the use of working mode of capacitive energy storage devices for which charge pulse repetition rate is much higher than discharge pulse repetition rate allows to reduce the voltage control imprecision value for such devices to $\pm(1\div3)\%$ or less. References 21, figures 6.

Key word: accuracy of a voltage regulation, capacitive energy store, charge circuit, wave resistance, transient, entry conditions.

1. *Bozhko I.V., Kobylchak V.V.* Power supply for pulse electric discharge technology in water treatment // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2014. – No 3. – Pp. 76–82. (Ukr)
2. *Bolotovskiy Yu.I., Tanazly H.Y., Vashkevich E.Y., Nikitin A.V.* Development of charge systems for capacitive energy storages // *Silovaia Elektronika*. – 2009. – No 1. – Pp. 34–45. (Rus)
3. *Vovchenko A.I., Divak N.P., Tertilov R.V.* Optimization of electric hydro pulse technologies and selection of appropriate modes of energy sources for them // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2009. – No 6. – Pp. 54–60. (Rus)
4. *Volkov I.V., Zozulov V.I., Sholokh D.O.* Design principals of compression magnetic semiconductor units for pulse technologies and lasers // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2011. – No 3. – Pp. 10–18. (Ukr)
5. *Denisov Yu.A., Velihorskiy A.A.* Voltage stabilization quality at power electronics systems proportional (P) and proportional-integral (PI) regulators // *Tekhnichna Elektrodynamika*. *Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2004. – Vol. 3. – Pp. 81–86. (Rus)
6. *Zakharchenko S.N.* Statistical studies of equivalent electrical resistance of the current-carrying heterogeneous medium at its electric-erosive processing on the example of aluminum pellets in water // *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. – 2013. – No 1 (133). – Pp. 62–67. (Ukr)
7. *Zakharchenko S.N., Rudenko Yu.V.* Comparative analysis of capacitors pulse charge algorithms at the systems of plasma-erosive treatment for heterogenic current-conductive mediums // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2014. – No 37. – Pp. 100–108. (Rus)
8. *Korshunov A.* Dynamic calculation of stabilized DC voltage downconverter // *Silovaia Elektronika*. – 2005. – No 3. – Pp. 88–91. (Rus)
9. *Korshunov A.* Accuracy improving of the output voltage stabilization at step-up DC converter // *Silovaia Elektronika*. – 2011. – No 9. – Pp. 118–126. (Rus)
10. *Lopatko K.G., Melnichuk M.D.* Physics, synthesis and biological functionality of nanosize objects. – Kyiv: Vydavnychiy Tsentri Natsionalnoho Universytetu Bioresursiv i Pryrodokorystuvannia Ukrainy, 2013. – 297 p. (Ukr)
11. *Pentehov I.V.* Basis of theory for charging circuits of capacitive energy storage. – Kyiv: Naukova dumka, 1982. – 424 p. (Rus)
12. *Rudenko V.S., Senko V.I., Chizhenko I.M.* Conversion technics. – Kyiv: Vyshcha shkola, 1983. – 431 p. (Rus)
13. *Shidlovskiy A.K., Shcherba A.A., Suprunovska N.I.* Power processes in electrical pulse devices with capacitive energy storages. – Kyiv: Interkontinental-Ukraina, 2009. – 208 p. (Rus)
14. *Shcherba A.A., Zakharchenko S.N.* Semiconductor adaptive systems of volume electric spark processing of materials and mediums // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. *Elektroenerhetyka*. – 1999. – No 2. – Pp. 66–73. (Rus)
15. *Shcherba A.A., Zakharchenko S.N.* Stabilization and regulation of discharge pulses parameters at the systems of volume electric spark processing of heterogenic current-conductive mediums // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. *Elektrodynamika*. – 2001. – Pp. 30–35. (Rus)
16. *Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovska N.I., Shevchenko N.I., Monastyrskiy G.E., Peretyatko Yu.V., Petruchenko O.V.* Stabilization of modes of electrotechnological systems of obtaining spark-eroded micro and nano powders // *Tekhnichna Elektrodynamika*. *Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist"*. – 2006. – Part. 1. – Pp. 120–123. (Ukr)
17. *Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Yatsiuk S.A., Kucheriava I.N., Lopatko K.H., Aftandyliants E.H.* Method analysis for effectiveness improve of electric erosion coagulation with water medium treatment // *Tekhnichna Elektrodynamika*. *Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist"*. – 2008. – Part. 2. – Pp. 120–125. (Rus)
18. *Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E.* Spark-eroded particles: influence of processing parameters // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 95. – No 3. – Pp. 823–829.
19. *Danilenko N.B., Savelev G.G., Yavorovskii N.A., Yurmazova T.A., Galanov A.I., Balukhtin P.V.* Composition and Formation Kinetics of Erosion Products of the Metallic Charge in an Electric-Discharge Reactor // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2005. – Vol. 78. – No 9. – Pp. 1438–1443.
20. *Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hoffmann M.R., Chang J.-S.* Electrohydraulic Discharge and Nonthermal Plasma for Water Treatment // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2006. – Vol. 45. – Pp. 882–905.
21. *Nguyen P.K., Jin S., Berkowitz A.E.* Mn-Bi particles with high energy density made by spark erosion // *J. Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 115. – Pp. 17A756-1 – 17A756-3.

Надійшла 06.06.2016
Остаточний варіант 07.07.2016