

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СРЕД ОТ ПРОТЕКАЮЩЕГО В НИХ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

С.Н. Захарченко, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

*Приведены результаты исследования зависимости эквивалентного электрического сопротивления слоя металлических гранул от времени и тока, протекающего в слое, на примере Al. Описаны характерные участки зависимости сопротивления от времени. Проведен критический анализ функций, аппроксимирующих нелинейную зависимость сопротивления от тока при помощи трех известных и одного оригинального критерия. Показано, что наилучшим образом данную зависимость описывает гиперболическая функция первой степени, на основе которой предложена схема замещения электрического сопротивления гранулированной токопроводящей среды. Библ. 18, рис. 5, табл. 1.*

**Ключевые слова:** гранулированная токопроводящая среда, нелинейное сопротивление, аппроксимация

**Введение.** Формирование искровых каналов в местах электрических контактов между металлическими гранулами, которые образуют погружённый в жидкость слой, в результате протекания в нём импульсов тока от специального генератора, [1, 18] лежит в основе ряда технологических процессов. Основные из них: производство дисперсных порошков широкого спектра сплавов, в том числе со специальными свойствами (аморфной поверхностью, жаропрочных, сверхтвёрдых, магнитомягких, материалов с памятью формы и др.) [1, 4, 18]; получение устойчивых к седиментации коллоидных растворов биологически активных металлов [13]; обеззараживание и комплексная очистка сточных и технических вод от органических загрязнений и ионов тяжёлых металлов [2, 15]. К уникальным особенностям данного метода относятся возможность получения фиксированных малых доз порошков многокомпонентных сплавов без изменения их химического состава, одностадийность технологического процесса получения гидрозолей металлов, высокая оперативность управления режимами при обеззараживании и очистке жидких сред.

Повышение энергоэффективности и стабильности вышеуказанных технологических процессов и, как следствие, улучшение качества получаемой продукции затруднительно без всестороннего изучения электрических характеристик гранулированных токопроводящих сред и происходящих в них электрофизических явлений. Моделированию одной из них – зависимости электрического сопротивления слоя гранул от протекающего в нем тока – посвящена настоящая работа. Учёт данной зависимости повышает точность расчета переходных процессов в выходных цепях генераторов электрических импульсов при работе на реальную нагрузку и эффективность управления ими, что обуславливает **актуальность и важность** исследований.

Ранее электрические свойства гранулированных токопроводящих сред при протекании в них электрического тока описывались зависимостью среднего за время импульса активного сопротивления от амплитуды напряжения разрядных импульсов [6, 16]. Такой подход позволял рассчитывать энергетические характеристики импульсов, но был слишком грубым для расчета переходных процессов в выходных цепях генератора. Позднее в [12] предлагалось линеаризировать зависимость мгновенного электрического сопротивления слоя гранул от разрядного тока в нем и представить её в виде ступенчатой функции. Использование такой зависимости позволило перейти к расчету переходных процессов, но данный вид аппроксимации оказался грубым и неудобным для аналитических расчетов. В [10] была предложена аппроксимация рассматриваемой зависимости экспоненциальной функцией, однако не приводилась проверка адекватности предложенной модели реальному процессу. **Целью** настоящей работы является разработка адекватной математической модели зависимости мгновенных значений эквивалентного электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока, описывающей происходящие процессы с достаточной точностью, пригодной для экстраполяции и удобной для дальнейшего анализа.

**1. Методика, оборудование и материалы.** Для достижения поставленной цели использовался следующий подход. На лабораторной установке в режиме, близком к оптимальному для очистки сточных вод методом искроэрозионной коагуляции  $Al(OH)_3$  [15] и подобном описанному в [16], что

необходимо для сравнения результатов, были сняты группы пар синхронных осциллограмм напряжения и тока разрядных импульсов в нагрузке. Лабораторная установка состояла из следующих элементов: тиристорного генератора разрядных импульсов с емкостным накопителем энергии, разрядной камеры, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда с вертикальными плоскими электродами, и двухканального запоминающего осциллографа С8-17, снабженного стандартным делителем напряжения 1:10 и высокочастотным измерительным трансформатором тока с коэффициентом передачи  $1,72 \cdot 10^{-2}$  В/А [14-16]. При этом емкость рабочего конденсатора генератора импульсов составляла  $C=50$  мкФ, начальное напряжение на нем  $U_{C0}=180$  В, индуктивность соединительных кабелей разрядного контура  $L=1,8$  мкГн, сопротивление шунта разрядной камеры, необходимого для исключения аварийных ситуаций [14-16],  $R_{ш}=6$  Ом. Частота следования импульсов  $f=5$  Гц выбиралась низкой для исключения ее влияния на сопротивление слоя гранул [19].

В эксперименте использовались гранулы Al марки АЕ квазисферической формы диаметром  $d=4$  мм, прошедшие предварительную искроэрозионную обработку поверхности. Длина слоя гранул между электродами  $l=56$  мм, ширина  $b=22$  мм, высота  $h=50$  мм. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода с удельным электрическим сопротивлением в начале процесса  $\rho_F=25$  Ом·м при напряжениях свыше 20 В и комнатной температуре 25 °С. Высота воды в камере составляла 100 мм. Для исключения влияния гидродинамических сил на эквивалентное сопротивление слоя гранул в процессе измерений ее проток отсутствовал. В паузах между измерениями один раз в 30 секунд продукты эрозии периодически вымывались водным потоком, после чего он отключался.

Полученные таким образом 30 пар осциллограмм оцифровывались и усреднялись в программе Excel-2003 с целью минимизации влияния случайных факторов. Использование большего количества осциллограмм не приводило к повышению точности, поскольку в результате длительной электроискровой эрозии гранул изменения электрических параметров нагрузки становились заметными [14], следовательно, изменялись условия проведения экспериментов. В каждой точке, соответствующей моменту времени  $t_j$  усредненных дискретных зависимостей напряжения и тока импульсов от времени, мгновенное значение сопротивления слоя гранул  $r_j$  определялось как отношение мгновенных значений напряжения на нагрузке  $u_j$  к току в ней  $i_j$ . На следующем шаге значению тока  $i_j$  в момент времени  $t_j$  ставилось в соответствие значение сопротивления  $r_j$  в этот же момент времени, в результате чего получалась зависимость мгновенного значения сопротивления среды от протекающего в ней тока. На следующем шаге полученные дискретные зависимости были аппроксимированы различными аналитическими функциями, графики которых были похожи на полученную экспериментальную, а значения коэффициентов находились по четырем различным критериям с помощью методов минимизации невязки. При этом использовался модуль «Поиск решения» программы Excel-2003.

В качестве первого критерия был выбран наиболее широко применяемый – минимальное значение корня среднеквадратичного отклонения экспериментального и приближенного значений  $\sigma$ . Как показала практика, применение данного критерия для поиска оптимальных значений коэффициентов аппроксимирующих функций обеспечивает малую среднюю абсолютную разницу экспериментальных и приближенных значений. Однако, если разница между экспериментом и его аппроксимацией хотя бы в одной точке, имеющей большое значение функции, велика, это существенным образом влияет на величину коэффициентов аппроксимирующей функции, приводя к плохим совпадениям на других участках.

Уменьшить пагубное влияние больших величин разностей экспериментальных и аппроксимированных значений в локальных точках на качество аппроксимации можно, используя критерий наименьшей средней суммы относительных погрешностей  $\delta_{cp}$ . Однако при использовании данного критерия возможна ситуация, когда сумма положительных относительных погрешностей аппроксимации в значительной степени компенсируется суммой отрицательных, а значения коэффициентов аппроксимирующей функции далеки от оптимальных.

Применение минимума средней суммы модулей относительных погрешностей  $|\delta|_{cp}$  в качестве критерия поиска оптимальных значений коэффициентов аппроксимирующих функций позволяет избавиться от описанного выше недостатка. Заметим, что общим недостатком двух последних критериев является вероятность плохого совпадения экспериментальных и аппроксимированных значений в локальных точках в случае больших их величин, например, в начале или в конце диапазона аппроксимации либо вблизи локальных экстремумов.

Вот почему для повышения качества аппроксимации во всем диапазоне экспериментальной

зависимости целесообразно использовать интегральный критерий, объединяющий достоинства вышеперечисленных. При определении показателей качества продукции в теории функционально-стоимостного анализа и управления качеством широко используются обобщенные показатели, основанные на сумме или произведении простых показателей с соответствующими весовыми коэффициентами или в степенях весовых коэффициентов [5]. В нашем случае использование произведения локальных критериев не дает требуемого результата, поскольку очень малое значение одного из них (например,  $\delta_{cp}$ ) нивелирует вклад остальных. На основе анализа известных обобщенных показателей качества для рассматриваемого случая предлагается следующий интегральный критерий качества аппроксимации

$$\beta = \frac{100\%}{3} \left( \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} + \frac{\delta}{\delta_{\max}} + \frac{|\delta|}{|\delta|_{\max}} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное значение корня среднеквадратичного отклонения экспериментального и приближенного значений среди всех рассмотренных аппроксимирующих функций при подборе их коэффициентов по критерию наименьшего  $\sigma$ ;  $\delta_{\max}$  – максимальное значение средней суммы относительных погрешностей экспериментального и приближенного значений среди всех рассмотренных аппроксимирующих функций при подборе их коэффициентов по критерию наименьшей  $\delta$ ;  $|\delta|_{\max}$  – максимальное значение средней суммы модулей относительных погрешностей экспериментального и приближенного значений среди всех рассмотренных аппроксимирующих функций при подборе их коэффициентов по критерию наименьшей  $|\delta|_{cp}$ .

В случае рассмотрения только одной аппроксимирующей функции в (1) целесообразно при нормировании  $\sigma$  вместо  $\sigma_{\max}$  использовать максимальное значение модуля разности экспериментального и приближенного значений, а относительные погрешности в (1) не нормировать. Альтернативными нормирующими коэффициентами могут быть также математическое ожидание по всей выборке экспериментальных значений для  $\sigma$  либо коэффициенты, найденные методом экспертных оценок для всех слагаемых.

**2. Анализ экспериментальных зависимостей.** На рис. 1 сплошной линией обозначена усредненная экспериментальная зависимость напряжения импульсов на нагрузке от времени, точками – усредненная экспериментальная зависимость тока, пунктирной – зависимость мгновенного значения эквивалентного электрического сопротивления среды от времени импульса, полученная как частное значений первой и второй зависимостей в каждой точке.

На рис. 2 и последующих полыми треугольниками показана экспериментальная зависимость эквивалентного электрического сопротивления слоя гранул от протекающего в нём тока по данным рис. 1. Цифрой 1 обозначена точка, соответствующая началу импульса, 2 – амплитудному значению тока, а 3 – окончанию импульса. Заметим, что особенностью зависимости сопротивления данной среды от тока в ней является несовпадение кривых, соответствующих нарастанию и убыванию тока, что видно из графиков. В качестве аппроксимирующей на графике рис. 2 показана экспоненциальная функция, предложенная в [10] (см. №3 в табл. 1) с коэффициентами, найденными по различным критериям: обозначенная точками – по наименьшему среднеквадратичному отклонению; сплошными линиями – по наименьшему значению интегрального критерия (1); штриховыми – по наименьшему значению средней суммы модулей относительных погрешностей. Полыми окружностями представлены значения этой же функции с коэффициентами, предложенными в [10]. Значения коэффициентов рассматриваемой функции, найденные по критерию наименьшей средней относительной погрешности (табл.), в данном конкретном случае практически совпали со значениями, найденными по наименьшему значению интегрального критерия (1), поэтому данный график не приводится.

Из рис. 2 и табл. следует, что значения коэффициентов [10] не являются оптимальными в рассмотренном диапазоне изменения функции для ее приближения к экспериментальным значениям. Величины коэффициентов, найденные по критерию  $\min \sigma$ , обеспечивают хорошее совпадение значений функции и экспериментальных данных только на небольшом участке, где значения функции велики ( $r > 15 \text{ Ом}$ ). Величины коэффициентов, найденные по критерию  $\min |\delta|_{cp}$ , напротив, обеспечивают хорошее совпадение значений функции и экспериментальных данных в довольно большом диапазоне изменения аргумента от 10 до 90 А, где значения функции малы, при удовлетворительном совпадении в диапазоне от 1 до 10 А. Величины коэффициентов, найденные по критерию  $\min \beta$ , позволяют добиться хорошего

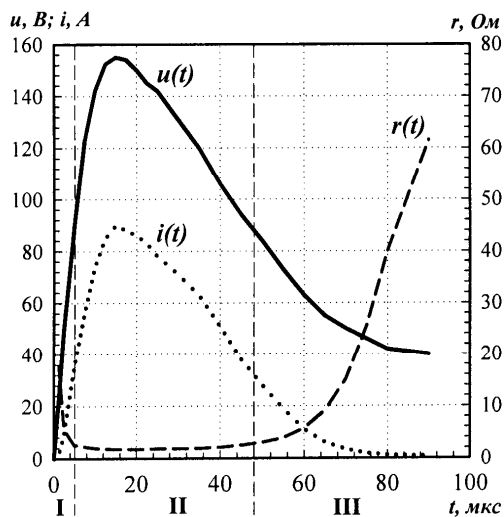


Рис. 1

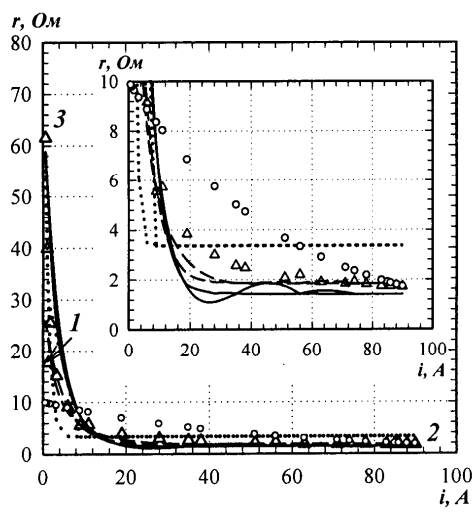


Рис. 2

Как видно из рис. 1, импульсы напряжения на нагрузке и тока в ней начинаются синхронно с нулевых значений. Кроме того, они достигают своих амплитудных значений в один и тот же момент времени (около 14 мкс с момента начала протекания тока). Это позволяет предположить, что в рассмотренных условиях нагрузка не проявляет существенных инерционных свойств и при моделировании её сопротивления в рассмотренном режиме ими можно пренебречь, что упрощает задачу.

Анализируя изменение во времени эквивалентного электрического сопротивления слоя в течение длительности импульса тока в нём (рис. 1), можно выделить три характерных участка. Первый участок назовем участком возникновения сквозных каналов протекания тока (на рис. 1 обозначен I). На нем сопротивление стремительно падает от начального значения 25 Ом (предел измеренной величины обусловлен не фундаментальными физическими константами, а техническими возможностями измерительной аппаратуры и скоростью нарастания тока в нагрузке) до 5 Ом за промежуток времени от 0 до 5 мкс. В течение этого времени напряжение на нагрузке и ток в ней нарастают от нуля до приблизительно половины своих амплитудных значений (около 80 В для напряжения и около 40 А для тока). Предположительно на данном участке в результате пробоя поверхностных слабопроводящих пленок гранул и электродов формируются и развиваются сквозные каналы протекания тока в их слое и возникают первые искрения. В пользу этой гипотезы свидетельствуют данные скоростной кино-фотосъемки искровых разрядов в слое гранул алюминия [17], а также значение минимальной амплитуды напряжения импульса, достаточной для возникновения искровых каналов в аналогичных условиях [16]. Условно участок I можно назвать участком пробоя.

Второй участок, назовём его участком развитых искрений (на рис. 1 обозначен II), характеризуется незначительным изменением сопротивления слоя от 5 Ом до 2 Ом и обратно до 5 Ом за время от 5 до 50 мкс с момента начала импульса. Напряжение и ток на этом участке изменяются существенно: в начале нарастают от приблизительно половины амплитудных значений до максимальных, а затем уменьшаются – напряжение до 80 В (0,51 амплитудного значения), а ток до 30 А (0,3 амплитудного значения). При этом амплитудному значению тока соответствует минимальное значение сопротивления. Как видим, на данном участке зависимость сопротивления слоя от напряжения либо тока разрядного импульса минимальна. Это можно объяснить следующим образом.

Во-первых, вольт-амперная характеристика даже одиночного разряда в газе, к которому относятся как дуговой, так и искровой разряды, содержит участки, на которых эквивалентное электрическое сопротивление плазменного канала слабо зависит от протекающего в нём тока, например, квазилинейный участок с положительным дифференциальным сопротивлением [7, 8]. Возможно, рабочие точки развитых искровых разрядов, каких большинство на участке II, находятся как раз на таких квазилинейных участках вольт-амперной характеристики [8].

Во-вторых, явление стабилизации сопротивления слоя на этом участке можно объяснить наличием как минимум двух процессов, зависящих от приложенного к нему напряжения и протекающего в нем тока, влияние которых на его сопротивление взаимно противоположно. С одной стороны, увеличение напряжения на слое приводит к повышению степени ионизации плазменных каналов, увеличению

совпадения экспериментальных и приближенных значений во всем диапазоне данных, незначительно уступая двум предыдущим критериям на соответствующих краях диапазона. В дальнейшем графики аппроксимирующих функций будем приводить только для коэффициентов, величины которых найдены по критерию  $\min \beta$ .

площади их поперечного сечения [7] и росту числа параллельно включенных каналов протекания тока между гранулами. С другой стороны, как показали наши наблюдения и данные [17], к возникновению последовательно включённых плазменных каналов в местах омических контактов между гранулами. Первая группа процессов приводит к уменьшению эквивалентного электрического сопротивления слоя, а вторая – к его увеличению, т.к. к переходным сопротивлениям контактов между гранулами добавляются сопротивления возникающих последовательно включённых плазменных каналов.

Рассматривая разрядный контур генератора импульсов, включающий в себя слой гранул как замкнутую систему, легко убедиться, что влияние возникновения новых плазменных каналов в местах омических контактов между гранулами аналогично влиянию последовательной отрицательной обратной связи по напряжению. Если в результате роста напряжения на слое гранул создаются условия для возникновения нового плазменного канала в месте омического контакта между гранулами, то падающее на этом контакте напряжение вырастет на величину его падения на плазменном канале. При этом прирост напряжения на рассматриваемом контакте может превысить вызвавшее его увеличение напряжения на всем слое. Следовательно, значения напряжений на остальных последовательно включенных контактах уменьшаются, т.е. рост напряжения на всем слое при определённых условиях вызывает уменьшение напряжения на единичном последовательно соединённом искрящем контакте.

То есть можно утверждать, что последовательная отрицательная обратная связь по напряжению будет осуществляться, начиная с момента возникновения первого плазменного канала и заканчивая наличием плазменных каналов между всеми последовательно включенными гранулами цепи протекания тока в их слое. Верхняя граница диапазона напряжений импульсов, при которых наблюдается данное явление, определяется числом последовательных электрических контактов, в которых может возникнуть плазменный канал и величинами падения напряжения на таких каналах, контактах и на самих гранулах.

Нижняя граница данного диапазона будет определяться либо суммой напряжений пробоя обладающих низкой электропроводностью поверхностных плёнок гранул, которые образуют цепь протекания тока, либо падений напряжений на переходных сопротивлениях контактов гранул, не имеющих таких плёнок, а также падением напряжения на самих гранулах и минимально возможным падением напряжения на одном плазменном канале. Очевидно, что с увеличением числа последовательных контактов между гранулами по причинам уменьшения их размеров в процессе эрозии или регулирования межэлектродного расстояния в сторону увеличения, или принятия специальных мер по искривлению путей протекания тока в слое как нижняя, так и верхняя границы рассматриваемого диапазона будут возрастать.

Чем больше разница между напряжениями возникновения плазменного канала между гранулами и пробоя их поверхностных плёнок, а также чем больше последовательно включённых гранул образуют цепь протекания тока, тем шире диапазон напряжений импульсов, при которых наблюдается последовательная отрицательная обратная связь. Так, для гранул меди, покрытых относительно тонкой оксидной пленкой, а также для гранул платины, такой пленки не имеющих, оговоренный диапазон в случае шероховатой поверхности и малого диаметра, как правило, шире, чем для аналогичных гранул алюминия, покрытых сравнительно толстой оксидной пленкой. Важно учесть, что состояние поверхности и радиус кривизны гранул играют важную роль в процессах искрообразования.

Рассуждая аналогично, уменьшение эквивалентного электрического сопротивления слоя гранул при росте тока импульса в результате появления дополнительных параллельно включенных контактов и снижения сопротивления существующих плазменных каналов, можно сравнить с действием параллельной положительной обратной связи по току. Логично предположить, что диапазон токов, при котором наблюдается данное явление, будет определяться, с одной стороны, числом возможных параллельно соединенных каналов протекания тока в слое и минимальным приростом тока, достаточным для создания новых каналов его протекания, а с другой стороны – минимальной плотностью тока, достаточной для образования плазменного канала. Как известно [3], наличие положительной обратной связи приводит к уменьшению входного сопротивления системы, а отрицательной – к его увеличению, что и происходит в рассмотренных выше случаях.

Приведенные толкования процессов возникновения последовательных и параллельных плазменных каналов предполагают дискретность как увеличения сопротивления слоя при росте напряжения на нём, так и его уменьшения при росте тока в нём в определённых пределах. Однако на практике при работе со слоями гранул от 20 шт. в поперечном сечении и от 8 шт. в длину такая дискретность замечена не была. Это может объясняться перераспределением напряжений на других контактах как последовательно, так и параллельно включённых, таким образом, что общее сопротивление слоя изменялось плавно, по

крайней мере, по показаниям используемых измерительных приборов. Для проверки гипотезы дискретного изменения сопротивления слоя с ростом напряжения на нём необходимы дополнительные исследования с использованием цепочки гранул, соединенных исключительно последовательно.

Третий участок зависимости эквивалентного электрического сопротивления слоя от длительности разрядного импульса в нём на рис. 1 обозначен III. Его можно назвать участком затухания искрений, поскольку сопротивление слоя на нём продолжает расти, причем скорость роста постоянно увеличивается. Причины данного явления следующие. Во-первых, снижение напряжения импульсов неизбежно влечёт за собой снижение степени ионизации плазменных каналов и уменьшение площади их поперечного сечения, а также исчезновение параллельно существующих искровых каналов. Во-вторых, электроискровая эрозия увеличивает расстояние между микровыступами поверхностей соседних гранул в местах искровых контактов, вынуждая плазменные каналы мигрировать по их поверхности на участки, переходное сопротивление контактов которых изначально было выше, чем сопротивление контактов, в которых ранее возникли искрения. Кроме того, имеет место разлёт гранул в результате электрического взрыва и их электрохимическая коррозия. Отметим, что действие последних двух факторов крайне медленное по сравнению с длительностью разрядного импульса, поэтому в рассматриваемых условиях им можно пренебречь, хотя при низкой скважности импульсов они оказывают влияние на условия искрообразования в слое для последующего разрядного импульса [19].

Как видно из рис. 1, скорость изменения сопротивления, напряжения и тока на участке III меньше, чем на участке I, что обусловлено разными электрофизическими процессами, преобладающими на данных участках. Это позволило зафиксировать параметры разрядных импульсов на участке III при меньших значениях тока, чем на участке I, что обусловило фиксацию большего значения сопротивления в конце участка III, чем в начале участка I. Заметим, что из-за эрозии поверхности гранул создаются условия для роста сопротивления их слоя к концу разрядного импульса по сравнению с его значением в начале.

**3. Аппроксимация зависимости эквивалентного электрического сопротивления слоя гранул от тока в нём.** Уравнения аппроксимирующих функций, значения их коэффициентов, найденные по различным критериям, и показатели качества аппроксимации приведены в таблице. Алгебраические полиномы, предложенные в [6] для аппроксимации зависимости среднего за время импульса значения сопротивления гранулированной среды от амплитуды приложенного напряжения (№1 и №2 в табл.) не позволяют корректно решить поставленную задачу. Они не обладают достаточной точностью и не позволяют экстраполировать полученные результаты, т.к. значения экспериментальных данных и аппроксимирующих функций существенно расходятся за пределами рассмотренной области. Заметим, что показатели качества аппроксимации улучшаются с ростом степени полинома. Однако высокие степени полиномов затрудняют использование аналитических методов при анализе переходных процессов в рассмотренных цепях.

Использование в качестве аппроксимирующей функции экспоненты (№3 в табл.), предложенной в [10], позволяет по сравнению с предыдущими функциями расширить диапазон экстраполяции в область малых значений аргумента и дает неплохие совпадения с экспериментальными данными в области больших.

Как известно из [9], функции на основе логарифмических имеют вид, похожий на экспериментальную зависимость (№4 – №8 в табл.). На рис. 3 показаны графики лучших функций данной группы: точками обозначен график функции №4 из табл., сплошными линиями – №6, а штриховыми – №7. Из табл. и графиков на рис. 3 видно, что логарифмические функции хорошо аппроксимируют рассматриваемую зависимость. В частности, функции №6 и №7 обладают лучшими показателями качества аппроксимации, чем экспоненциальная функция №3. Наилучший результат в данной группе во всем диапазоне значений аргумента позволяет получить функция №7, а наихудший – №5. Однако заметим, что использование функции №7 при значениях аргумента в окрестности нуля может приводить к росту погрешности приближения, что позволяет избежать функция №8. Функции №4 – №6 из табл. легко интегрируются и дифференцируются и могут быть удобными для аналитических расчетов, чего нельзя сказать о функциях №7 и №8.

На рис. 4 показаны графики гиперболических функций аппроксимации из табл.: №9 – обозначена точками, №10 – сплошными линиями, №13 – штриховыми. Как видно, наилучшим образом данную зависимость из всех рассмотренных аппроксимируют функции под номерами 10 и 11 в табл. 1, соответствующие гиперболам первой степени. Увеличение степени гиперболической функции сдвигает ее график ближе к центру координат и осям от экспериментальных значений, ухудшая показатели качества аппроксимации (табл.). Уменьшение ее степени приводит к обратному эффекту. Из рас-

смотренных в табл. степеней гиперболических функций 0,5, 1, 1,5 и 2 оптимальной степенью для приближения данной зависимости является первая.

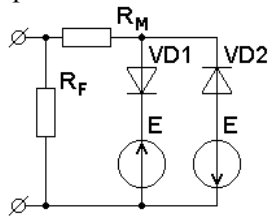


Рис. 5

Коэффициенты функций №10 и №11 имеют однозначный физический смысл. Схема замещения сопротивления слоя гранул, составленная на основании функции №11 из табл., показана на рис. 5. Коэффициент  $a_0$  функций №10 и №11 представляет собой линейное активное сопротивление среды, обусловленное главным образом омическим сопротивлением металлических гранул и линейной составляющей переходных сопротивлений контактов и плазменных каналов, обозначенное на рис. 1  $R_M$ . Коэффициент  $a_1$  представляет собой ЭДС эквивалентного источника (на рис. 5 обозначенного  $E$ ), включенного навстречу

протеканию тока и моделирующего падение напряжения на нелинейной составляющей сопротивления плазменных каналов в слое гранул. Коэффициент  $a_2$  в формуле №11 моделирует линейризованное сопротивление рабочей жидкости, в которой находятся металлические гранулы, включенное параллельно основной цепи и на рис. 5 обозначенное  $R_F$ . Идеальные диоды VD1 и VD2 на рис. 5 отображают операцию взятия модуля в аппроксимациях №10 и №11. Это необходимо при рассмотрении колебательных процессов в гранулированных токопроводящих средах, когда ток в определенный момент времени меняет направление протекания.

Заметим, что в [11] эквивалентное сопротивление электрической дуги предлагалось аппроксимировать формулой, аналогичной №10 из табл., что говорит о наличии общих особенностей для дуговых и искровых разрядов. Гиперболические функции №9, №10 и №12 – №15 содержат особую точку 0 и, если аргумент принимает значение в ее окрестности, использование данных функций в этих точках нецелесообразно. Однако, данный недостаток легко устраняется добавлением бесконечно малой величины к аргументу  $i$  или переходом к функции №11, которая характеризуется наилучшими показателями качества аппроксимации среди всех рассмотренных в данной работе.

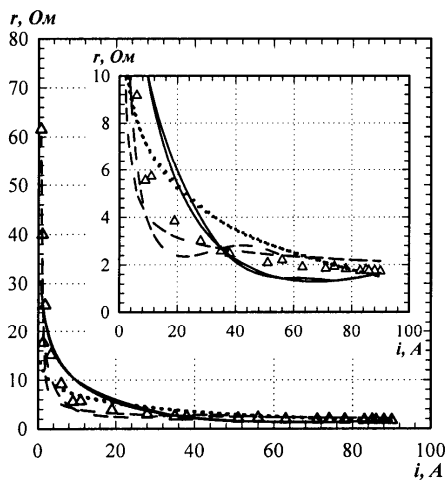


Рис. 3

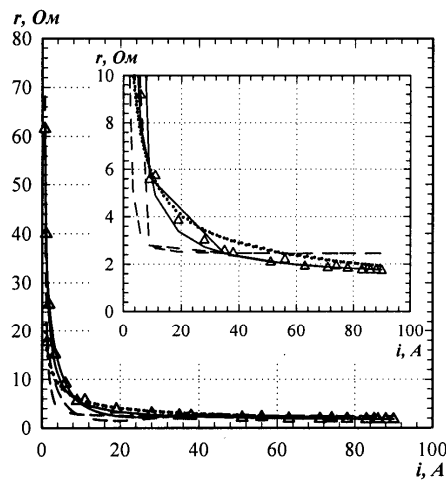


Рис. 4

Показатели качества аппроксимации функциями №14 и №15, представляющими собой комбинацию гиперболы первой степени с гиперболами второй и третьей степени, соответственно хуже, чем аналогичные показатели для функций №10 и №11. Это свидетельствует об отсутствии в зависимости сопротивления среды от протекающего в ней тока даже незначитель-

ных составляющих, которые описываются гиперболами степени 2 и 3.

#### Выводы.

1. Показано, что экспериментальная зависимость мгновенных значений сопротивления слоя металлических гранул от протекающего в нем тока содержит три характерных участка: возникновения сквозных каналов протекания тока, развитых искрений и затухания искрений. Каждый из них характеризуется преобладанием определенных физических процессов, которые отражены в названиях участков.

2. Предложен интегральный критерий поиска оптимальных значений аппроксимирующих функций, учитывающий особенности применения критериев минимального среднеквадратичного отклонения, минимальной средней суммы относительных погрешностей аппроксимации и минимальной средней суммы модулей относительных погрешностей аппроксимации. Применение данного критерия позволило повысить качество аппроксимации во всем диапазоне изменения аргумента функции.

3. В качестве функций, аппроксимирующих зависимость мгновенных значений сопротивления слоя металлических гранул от протекающего в нем тока, рассмотрены полиномиальные, экспо-

ненциальные, логарифмические и гиперболические. Показано, что по рассмотренным показателям качества аппроксимации наилучшими являются функции на основе гипербол первой степени.

Таблица

№ ф-и	Уравнение аппроксимирующей функции	Критерий поиска коэфф.	Значения коэффициентов функций						Показатели качества аппроксимации			
			$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$\sigma$ , Ом	$\delta_{cp}$ , %	$ \delta _{cp}$ , %	$\beta$ , %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1.	$r = \sum_{n=0}^2 a_n i^n$	min $\sigma$	20	-0,5	$3,29 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	10,64	-34,33	69,2	206,96
		min $\delta_{cp}$	20	-0,5	$3,13 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	10,66	-8,95	90,34	126,42
		min $ \delta _{cp}$	2,86	0	$4,56 \cdot 10^{-6}$	-	-	-	15,85	$-7,24 \cdot 10^{-4}$	37,94	211,93
		min $\beta$	2,86	0	$4,56 \cdot 10^{-6}$	-	-	-	15,85	$2,51 \cdot 10^{-15}$	55,60	86,38
2.	$r = \sum_{n=0}^5 a_n i^n$	min $\sigma$	20	-0,71	$-4,7 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-9}$	10,28	-4,06	50,53	80,74
		min $\delta_{cp}$	20	-0,712	$-4,7 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-9}$	10,28	$5,23 \cdot 10^{-2}$	50,69	65,90
		min $ \delta _{cp}$	20	-0,71	$-4,73 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-9}$	10,28	-3,58	50,46	78,90
		min $\beta$	20	-0,712	$-4,7 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-9}$	10,28	$5,23 \cdot 10^{-2}$	50,69	65,90
3.	$r = a_0 + a_1 \exp(- i /a_2)$	min $\sigma$	3,364	116,0	0,883	-	-	-	3,958	-34,48	56,21	177,99
		min $\delta_{cp}$	1,422	68,58	3,666	-	-	-	8,73	$4,12 \cdot 10^{-7}$	40,71	54,24
		min $ \delta _{cp}$	1,845	27,62	4,519	-	-	-	8,35	10,99	15,93	77,60
		По [10]	0,1	9,9	50	-	-	-	13,15	-18,69	45,46	140,85
		min $\beta$	1,422	66,33	3,666	-	-	-	8,73	$4,12 \cdot 10^{-7}$	40,71	54,24
4.	$r = a_0 + a_1(1 - \ln i )$	min $\sigma$	23,07	6,589	-	-	-	-	7,92	-29,01	80,20	185,90
		min $\delta_{cp}$	6,927	1,377	-	-	-	-	13,66	$-4,7 \cdot 10^{-14}$	34,85	65,82
		min $ \delta _{cp}$	6,605	1,421	-	-	-	-	13,76	15,61	22,82	116,34
		min $\beta$	10,12	2,464	-	-	-	-	12,04	$1,45 \cdot 10^{-5}$	28,45	56,53
5.	$r = a_0 + a_1(1 - \log_{a_2} i )$	min $\sigma$	0,347	31,79	90	-	-	-	7,96	-50,01	86,25	268,25
		min $\delta_{cp}$	0,454	9,4	202	-	-	-	13,06	$1,3 \cdot 10^{-12}$	30,35	60,97
		min $ \delta _{cp}$	0,539	9,9	145	-	-	-	12,83	9,47	24,64	91,79
		min $\beta$	0	11,54	190	-	-	-	12,43	$1,14 \cdot 10^{-5}$	27,51	57,11
6.	$r = a_0 + a_1(1 - \ln i ) + a_2 i$	min $\sigma$	24,65	11	0,169	-	-	-	6,39	$-9,27 \cdot 10^{-4}$	48,72	52,21
		min $\delta_{cp}$	19	8	0,118	-	-	-	7,43	$4,35 \cdot 10^{-9}$	28,55	42,13
		min $ \delta _{cp}$	10,35	3,684	$4,858 \cdot 10^{-2}$	-	-	-	11,47	11,38	15,05	88,29
		min $\beta$	19	8	0,118	-	-	-	7,43	$4,35 \cdot 10^{-9}$	28,55	42,13
7.	$r = a_0 + a_1/(\ln i  + a_2)$	min $\sigma$	0,396	11,68	0,241	-	-	-	3,15	-28,39	40,76	142,56
		min $\delta_{cp}$	0	10,24	0,26	-	-	-	3,76	$-9,94 \cdot 10^{-8}$	21,82	26,20
		min $ \delta _{cp}$	0	8,8	0,28	-	-	-	4,87	14,34	18,22	80,72
		min $\beta$	0	10,24	0,26	-	-	-	3,76	$3,73 \cdot 10^{-6}$	21,82	26,20



Продолжение таблицы

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
8.	$r = a_0 + a_1/(\ln i + a_2 )$	$\min \sigma$	0,937	9,295	0,213	-	-	-	3,22	-31,79	44,65	158,03
		$\min \delta_{cp}$	0	9,106	0,276	-	-	-	12,49	$8,36 \cdot 10^{-7}$	22,59	54,04
		$\min  \delta _{cp}$	0	8,181	0,226	-	-	-	3,88	12,37	16,18	68,94
		$\min \beta$	0	9,106	0,276	-	-	-	12,49	$8,36 \cdot 10^{-7}$	22,59	54,04
9.	$r = a_0 + a_1 i ^{-0,5}$	$\min \sigma$	0	35,61	-	-	-	-	5,68	-95,01	98,61	436,92
		$\min  \delta _{cp}$	0,2	16,99	-	-	-	-	10,14	$8,54 \cdot 10^{-7}$	22,08	46,36
		$\min  \bar{\delta} $	0	16,34	-	-	-	-	10,46	10,52	14,52	81,58
		$\min \beta$	0	18,26	-	-	-	-	9,74	$8,32 \cdot 10^{-6}$	20,09	43,78
10.	$r = a_0 + a_1 i ^{-1}$	$\min \sigma$	1,484	37,34	-	-	-	-	2,89	-2,86	10,69	26,78
		$\min \delta_{cp}$	1,46	35,89	-	-	-	-	2,96	$-2,53 \cdot 10^{-9}$	10,78	16,40
		$\min  \delta _{cp}$	1,288	40,65	-	-	-	-	3,19	-0,59	7,997	17,45
		$\min \beta$	1,331	39,15	-	-	-	-	2,98	$2,03 \cdot 10^{-5}$	8,32	14,83
11.	$r = \frac{a_2(a_0 + a_1 i ^{-1})}{a_0 + a_1 i ^{-1} + a_2}$	$\min \sigma$	1,37	38,5	2600	-	-	-	2,92	-0,089	9,02	15,42
		$\min \delta_{cp}$	1,27	41,81	696	-	-	-	3,047	$3,77 \cdot 10^{-10}$	7,83	14,72
		$\min  \delta _{cp}$	1,195	49,62	229,4	-	-	-	3,406	-4,04	6,32	29,91
		$\min \beta$	1,27	41,81	696	-	-	-	3,047	$3,77 \cdot 10^{-10}$	7,83	14,72
12.	$r = a_0 + a_1 i ^{-1,5}$	$\min \sigma$	3,254	32,30	-	-	-	-	3,458	-34,98	51,33	175,06
		$\min \delta_{cp}$	1,409	74,85	-	-	-	-	19,82	$3,91 \cdot 10^{-7}$	37,57	86,93
		$\min  \delta _{cp}$	1,788	41,11	-	-	-	-	5,174	9,876	20,72	66,69
		$\min \beta$	2,215	33,86	-	-	-	-	3,6	$6,42 \cdot 10^{-7}$	25,75	28,30
13.	$r = a_0 + a_2i^{-2}$	$\min \sigma$	4,232	-	26,72	-	-	-	4,693	-61,08	80,37	295,37
		$\min \delta_{cp}$	1,3	-	103,2	-	-	-	41,19	$7,9 \cdot 10^{-11}$	62,49	170,34
		$\min  \delta _{cp}$	1,84	-	26,79	-	-	-	5,26	21,90	24,84	114,47
		$\min \beta$	2,447	-	28,34	-	-	-	4,99	$4,42 \cdot 10^{-7}$	32,68	37,22
14.	$r = a_0 + a_1 i ^{-1} + a_2i^{-2}$	$\min \sigma$	1,835	31,65	4,449	-	-	-	2,8	-9,54	18,39	56,48
		$\min \delta_{cp}$	1,46	31,65	10,95	-	-	-	4,44	$-10^{-7}$	12,3	22,03
		$\min  \delta _{cp}$	1,288	40,65	0,01	-	-	-	3,19	-0,59	8,00	17,47
		$\min \beta$	1,331	39,13	$9,99 \cdot 10^{-3}$	-	-	-	2,98	$2,41 \cdot 10^{-7}$	8,33	14,83
15.	$r = a_0 + a_1 i ^{-1} + a_3 i ^{-3}$	$\min \sigma$	1,805	33,30	-	2,324	-	-	2,767	-9,60	17,85	56,23
		$\min \delta_{cp}$	1,465	31,74	-	10,95	-	-	6,72	$-2,99 \cdot 10^{-8}$	13,70	30,10
		$\min  \delta _{cp}$	1,288	40,64	-	$10^{-2}$	-	-	3,19	-0,57	8,00	17,40
		$\min \beta$	1,331	39,13	-	$10^{-2}$	-	-	2,98	$2,74 \cdot 10^{-4}$	8,33	14,83

4. Предложена схема замещения сопротивления слоя металлических гранул, построенная на основе гиперболической функции первой степени, и объяснен физический смысл ее коэффициентов.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов. – Фрунзе: Илим, 1990. – 256 с.
2. Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потатченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфицирующее действие объемного электроискрового разряда в воде // Химия и технология воды.– 1999. – №3.– Т. 21.– С. 328 – 336.
3. Забродин Ю.С. Промышленная электроника. – М.: Высш. школа, 1982. –496 с.
4. Монастырский Г.Е., Коваль Ю.Н., Шпак А.П., Мусиенко Р.Я., Коломыйцев В.И., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яковенко П.Г. Получение электроискровым методом порошков сплавов с эффектом памяти формы // Порошковая металлургия.– 2007.– № 5-6.– С.3-15.
5. Михеева Е.Н., Сероштан М.В. Управление качеством. – М.: издательско-торговая корпорация «Дашков и Ко», 2009. – 708 с.
6. Муратов В.А. Полупроводниковые преобразователи для питания технологических аппаратов электроэрозионного диспергирования / Дис... канд. техн. наук: 05.09.12. – К., 1986. – 279 с.
7. Намитков К.К. Электроэрозионные явления.– М.: Энергия, 1978. – 456 с.
8. Парфенов О.Д. Технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1986. – 320 с.
9. Рыбасенко В.Д., Рыбасенко И.Д. Элементарные функции: формулы, таблицы, графики. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 416 с.
10. Подольцев А.Д., Супруновская Н.И. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в нелинейной RLC цепи // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч.4. – С. 3–8.
11. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. – М.: Энергия, 1968. – 504 с.
12. Шидловский А.К., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электрических цепях разрядно-импульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку и ненулевых условиях его заряда // Техн. електродинаміка. – 2010. – №1. – С. 42–48.
13. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г. Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2009. – №22. – С. 74–79.
14. Щерба А.А., Захарченко С.М., Спінул Л.Ю. Закономірності змінення електричного опору шару алюмінієвих гранул при їх електроіскровому диспергуванні // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – № 25. – С. 133 – 139.
15. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Кучерявая И.Н., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г. Анализ методов повышения эффективности электроэрозионной коагуляции при очистке водных сред // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2008.– Ч.2.– С. 120-125.
16. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Захарченко С.Н. Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка' 2001. – 2001. – С. 3 – 16.
17. Щерба А.А., Штомпель И.В. Анализ электрических параметров и динамики искровых разрядов в слое токопроводящих гранул // Стабилизация параметров электрической энергии: Сб. науч. тр. – Киев: ИЭД НАН Украины.– 1991.– С. 65 – 73.
18. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2003. – № 254–255. – P. 1–6.
19. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment // Технічна електродинаміка. – 2006. – №2. – С. 10–14.

УДК 621.3.011.72

#### **МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ГРАНУЛЬОВАНОГО СТРУМОПРОВІДНОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД СТРУМУ, ЩО ПРОТІКАЄ В НЬОМУ**

**С.М. Захарченко**, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**

*Наведено результати дослідження залежності еквівалентного електричного опору шару металевих гранул від часу та від струму, що протікає в шарі на прикладі Al. Описані характерні ділянки залежності опору від часу. Проведено критичний аналіз апроксимуючих нелінійну залежність опору від струму функцій за допомогою трьох відомих та одного оригінального критеріїв. Показано, що найкращим чином цю залежність відображає гіперболічна функція першого порядку, на основі якої запропонована схема заміщення електричного опору гранульованого струмопровідного середовища. Бібл. 18, рис. 5, табл. 1.*

**Ключові слова:** гранульоване струмопровідне середовище, нелінійний опір, апроксимація.

## MODELLING OF DEPENDENCE OF ELECTRICAL RESISTANCE OF GRANULATED CURRENT-CARRYING MEDIUMS FROM A PULSE CURRENT PROCEEDING IN THEM

S.N. Zakharchenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

*Results of research of dependence of equivalent electric resistance of a layer of metal granules from time and from a current proceeding in a layer on example Al are given. Characteristics of areas of dependence of resistance from time are described. The critical analysis of the functions approximating nonlinear dependence of resistance from a current by means of three known and one original criteria is carried out. It is shown that in the best way given dependence is described by hyperbolic function of the first degree on which basis the equivalent circuit of electric resistance of the granulated current-carrying medium is offered. References 18, figures 5, table 1.*

**Key words:** the granulated current-carrying medium, nonlinear resistance, approximation.

1. Asanov U.A., Tsoj A.D., Shcherba A.A., Kazekin V.I. Electroerosive technology of interconnections and powders of metals. – Frunze: Ilym, 1990. – 256 p. (Rus)
2. Goncharuk V.V., Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Savluk O.S., Potapchenko N.G., Kosinova V.N. Disinfectant action of the volume electrospark discharges in water // *Khimiia i tehnologiia vody*. – 1999. – №3. – Vol. 21. – Pp. 328–336. (Rus)
3. Zabrodin Yu.S. Industrial electronics. – Moskva: Vysshiaia Shkola, 1982. – 496 p. (Rus.)
4. Monastirskiy G.E., Koval Yu.N., Shpak A.P., Musienko R.Ya., Kolomytsev V.I., Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Yakovenko P.G. Production of powders of alloys with effect of memory of the form by electrospark method // *Poroshkovaia metallurgiiia*. – 2007. – № 5-6. – Pp.3–15. (Rus)
5. Miheeva E.N., Seroshtan M.V. Quality management. – Moskva: publishing-trading corporation «Dashkov & Co», 2009. – 708 p. (Rus)
6. Muratov V.A. Semiconductor converters for a supply of technological devices electroerosive dispersion / Diss. ... cand. tech. sci.: 05.09.12. – Kyiv, 1986. – 279 p. (Rus)
7. Namytkov K.K. Electroerosive phenomenon. – Moskva: Energiia, 1978. – 456 p. (Rus)
8. Parfyonov O.D. Technology of microcircuits. – Moskva: Vysshiaia Shkola, 1986. – 320 p. (Rus)
9. Rybasenko V.D., Rybasenko I.D. Elementary of function: formulas, tables, schedules. – Moskva: Nauka, 1987. – 416 p. (Rus)
10. Podoltsev A.D., Suprunovskaya N.I. Modelling and the analysis of electric discharge processes in nonlinear RLC-circuits // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Problemy suchasnoi elektrotekhniki”*. – 2006. – Vol. 4. – Pp. 3–8. (Rus)
11. Phillipov E. Nonlinear electrical engineering. – Moskva: Energiia, 1968. – 504 p. (Rus)
12. Shidlovskiy A.K., Suprunovskaya N.I. Power processes in electric circuits of discharge-pulses installations with the capacitor store of energy at restriction of duration of its discharge on electrospark loading and nonzero conditions of its charge // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2010. – №1. – Pp. 42–48. (Rus)
13. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Lopatko K.G., Aftandiliants E.G. Application of volume electrospark dispersion for production steady to sedimentation hydrosols of biological active metals // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2009. – №22. – Pp. 74–79. (Rus)
14. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Spinul L.Yu. Regularity of change of electric resistance of a layer of aluminum granules at their electrospark dispersion // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2010. – №25. – Pp. 133–139. (Ukr)
15. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Yatsyuk S.A., Kucheriavaia I.N., Lopatko K.G., Aftandiliants E.G. Analys of methods of raise of efficiency of electroerosive coagulation for clearing of water medium // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist”*. – 2008. – Vol. 2. – Pp. 120–125. (Rus)
16. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Zakharchenko S.N. Regulation of dynamic parameters of technological systems of volume electrospark treatment heterogeneous current-carrying mediums // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2001. – Pp. 3–16. (Rus)
17. Shcherba A.A., Shtompel I.V. Analysis electrical parameters and dynamics of spark discharges in a layer current-carrying granules // *Stabilizatsiya parametrov elektricheskoi enerhii: Sbornik Nauchnikh Trudov*. – Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 1991. – Pp. 65–73. (Rus)
18. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2003. – № 254–255. – Pp. 1–6.
19. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2006. – №2. – Pp. 10–14.

Надійшла 28.05.2012

Received 28.05.2012