



УДК 621.3.015.52: 621.3.011.72

С. Н. Захарченко, канд. техн. наук,
Н. А. Шидловская, чл.-кор. НАН Украины
Ин-т электродинамики НАН Украины
(Украина, 03057, Киев, пр-т Победы, 56,
тел. (044) 4542425, e-mail: <snzakhar@bk.ru>)

Моделирование сопротивления гранулированных токопроводящих сред параметрическими зависимостями

На основе экспериментальных данных и анализа физических процессов при искроэрозионной обработке гранулированных токопроводящих сред создана параметрическая модель эквивалентного электрического сопротивления таких сред. В предложенной модели учтены фазы возникновения, развития и угасания искровых каналов, обусловленные динамикой генерации и рекомбинации свободных носителей заряда в них.

На основі експериментальних даних і аналізу фізичних процесів під час іскроерозійної обробки гранульованих струмопровідних середовищ створено параметричну модель еквівалентного електричного опору таких середовищ. У запропонованій моделі враховано фази виникнення, розвитку та згасання іскрових каналів, обумовлені динамікою генерації та рекомбінації вільних носіїв заряду в них.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическое сопротивление, гранулированные токопроводящие среды, искровые каналы, параметрическая модель.

Актуальность исследования характера сопротивления объемных электроискровых нагрузок [1] обусловлена не только необходимостью моделирования их как элемента разрядно-импульсных систем, но и углублением физического понимания происходящих в них процессов при протекании электрического тока. Это, в свою очередь, открывает новые подходы к управлению параметрами электрических импульсов в данных нагрузках и, как следствие, повышению эффективности систем объемной искроэрозионной обработки гетерогенных сред в конкретных технологических процессах, расширению их областей применения и повышению качества продукции.

В настоящее время данный метод применяется в технологических процессах получения седиментационно устойчивых нанодисперсных гидрозолей биологически активных металлов [2]. Будучи высокотехноло-

гичным и простым в реализации, он позволяет в рамках одной операции получать ультрадисперсные гидрозолы металлов и их соединений.

Применение в качестве генераторов импульсов современных полупроводниковых преобразователей на полностью управляемых ключах позволило снизить длительность импульсов до единиц и долей микросекунд. Это, в свою очередь, дало возможность уменьшить средний размер искроэрозионных частиц до единиц и долей микрон, однако, как показала практика, не привело к повышению седиментационной устойчивости полученных гидрозолой в течение более суток при требовании продолжительности устойчивости в течение нескольких месяцев.

Использование оригинального электрофизического подхода — принудительной механической активации слоя металлических гранул непосредственно в процессе их электроискрового диспергирования [3] — позволило не только уменьшить средний размер искроэрозионных частиц до десятков нанометров, но и получить гидрозолы Ag, Cu, Zn, Fe, Mn, Co, Mo, неседиментирующие в течение нескольких месяцев [2]. Специфические особенности электромагнитных процессов, происходящих в объемной электроискровой нагрузке при использовании данного подхода [2—4], заставили обратить внимание на физические процессы искрообразования в таких средах.

Было предпринято много попыток создать модель сопротивления такой нагрузки. В [1, 5] сопротивление гранулированной токопроводящей среды при протекании в ней импульсного тока определено как усредненное за время импульса активное значение и описано интегральным выражением

$$R = \int_0^T u(t) i(t) dt \Big/ \int_0^T i^2(t) dt, \quad (1)$$

где T — длительность электрического импульса в нагрузке, с; $u(t)$ — зависимость напряжения на нагрузке от времени; $i(t)$ — зависимость тока нагрузки от времени.

Для определения данного значения на практике требовались синхронные осциллограммы напряжения на нагрузке и тока в ней, которые затем дискретизировались, вследствие чего в формуле (1) интегралы заменялись суммами и выполнялись соответствующие вычисления. Для упрощения инженерных расчетов была предложена экспресс-методика определения данного сопротивления и средней за время импульса мощности только по характерным точкам синхронных осциллограмм напряжения на нагрузке и тока в ней, позволяющая обойтись без обработки всего массива данных при апериодическом, критическом и колебательном разрядах [6]. Такой

подход позволил рассчитывать энергетические параметры разрядных импульсов, но оказался недостаточно точным для расчетов переходных процессов в цепях с объемной электроискровой нагрузкой.

В работе [7] зависимость сопротивления нагрузки от протекающего в ней тока лианеризована и представлена в виде ступенчатой характеристики, а в работе [8] предложена аппроксимация данной зависимости экспоненциальной функцией. Такой подход позволил повысить точность моделирования переходных процессов, однако в [8] не приведены результаты проверки адекватности предложенной модели реальному процессу. В работе [9] на основе результатов практических опытов предложена аппроксимация зависимости (1) гиперболическими функциями и дано объяснение физического смысла их коэффициентов, что согласуется с более ранними моделями для одиночных искровых разрядов [10].

Особенностью всех упомянутых работ является акцентирование внимания на нелинейном характере сопротивления среды и, как следствие, игнорирование неоднозначности зависимости ее сопротивления от тока либо напряжения импульсов, вызванной эволюцией плазменных процессов в искровом канале и эрозией приконтактных областей гранул. Описанные явления приводят, в частности, к несимметрии зависимостей сопротивления среды во времени даже при условии симметричной во времени формы напряжения импульса. Кроме того, на практике наблюдается неоднозначность зависимости сопротивления среды от протекающего в ней импульсного тока либо приложенного импульсного напряжения, что невозможно учесть в исключительно нелинейных моделях.

Игнорирование указанной особенности нагрузки в некоторых случаях допустимо при расчетах для одной моды, но приводит к существенным ошибкам при анализе тока в разрядной цепи в течение всего времени переходного процесса, который, как правило, состоит из нескольких мод. Данные ошибки вызваны неправильным выбором начальных условий в случае нелинейной модели для второй и последующих мод, поскольку значения эквивалентного электрического сопротивления нагрузки в начале и в конце одной и той же моды могут быть существенно различны. Учет указанных особенностей возможен лишь в параметрических и нелинейно-параметрических моделях.

Представляется целесообразным создание адекватной параметрической модели эквивалентного электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред в процессе их искроэрозионной обработки.

Для более полного понимания процессов, определяющих характер сопротивления объемных электроискровых нагрузок, обратимся к физической сути явлений, происходящих в них при протекании электрического

тока. Как известно, физически такая нагрузка представляет собой слой гранул металла либо сплава и электродную систему, которые находятся в разрядной камере и погружены в охлаждающую жидкость с низкой удельной электропроводностью [1—4].

Известны и применены на практике, в зависимости от конкретной технологической задачи, различные варианты конструкций разрядных камер и электродных систем (с вертикальным, горизонтальным и наклонным расположением плоских электродов, коаксиальные конструкции), а также различные конфигурации слоя гранул (в виде цилиндра, прямоугольного параллелепипеда, с сужениями различной формы снизу, с боков и сверху) [1, 11—14]. Однако экспериментально было установлено, что для моделирования электрических параметров исследуемых электрофизических процессов, происходящих в гранулированных средах при протекании электрического тока, наиболее удобной является разрядная камера с вертикальным расположением электродов и слоем гранул в виде прямоугольного параллелепипеда.

Методика экспериментов. Были использованы гранулы электротехнического алюминия марки АЕ цилиндрической формы диаметром $d = 4$ мм и средней высотой $h_r = 5$ мм, поверхность которых подвергалась предварительной электроэрозионной обработке. Высота слоя гранул $h = 25$ мм, а ширина $b = 24$ мм, расстояние между алюминиевыми электродами $l = 52$ мм. В качестве рабочей жидкости использована водопроводная вода с исходным удельным электрическим сопротивлением $\rho_F = 90$ Ом·м, проток которой во время протекания тока в нагрузке отсутствовал.

В качестве генератора импульсов использован тиристорный формирователь с емкостным накопителем энергии $C = 200$ мкФ, начальное напряжение заряда которого регулировалось в диапазоне $U_{Co} = 120 \div 300$ В [1]. Индуктивность соединительных кабелей разрядного контура составляла при этом $L = 2$ мкГн. Для минимизации изменений параметров нагрузки вследствие электроискровой эрозии гранул и влияния на ее эквивалентное электрическое сопротивление частоты разрядных импульсов [15, 16] последняя выбрана минимально возможной: $f = 0,5$ Гц.

В каждом режиме с помощью двухканального аналого-цифрового запоминающего осциллографа Nameg НМ1507-3, снабженного стандартным делителем напряжения 1:10 и высокочастотным измерительным трансформатором тока, запоминались и сохранялись в подключенном к осциллографу компьютере [17] 30 пар синхронных осциллограмм напряжения на нагрузке и тока в ней (кроме режимов, близких к короткому замыканию и холостому ходу). Затем подача импульсов прекращалась и продукты эрозии гранул периодически вымывались из разрядной камеры

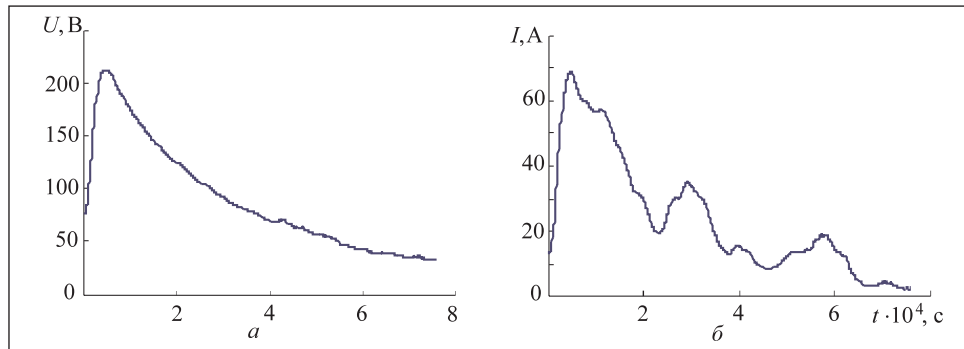


Рис. 1. Усредненные зависимости от времени напряжения на нагрузке (а) и тока в ней (б)

потоком водопроводной воды. Полученные таким образом осциллограммы для уменьшения результатов действия помех на всех этапах преобразования сигналов, а также ошибок дискретизации подвергали t -фильтрации, синхронизировали по времени начала импульса и усредняли с помощью оригинального программного обеспечения.

Результаты экспериментов. Усредненные по 30 характерным осциллограммам зависимости от времени напряжения на нагрузке и тока в ней при $U_{C_0} = 220$ В представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, а, даже при усреднении по 30 осциллограммам зависимость разрядного тока от времени имеет несколько мод: основная — от 0 до 230 мкс, вторая — от 230 до 380 мкс, третья — от 380 до 470 мкс и т.д. Результаты анализа осциллограмм тока, снятых в различных режимах, свидетельствуют о том, что относительная амплитуда неосновных мод увеличивается с увеличением длительности апериодического разряда при условии сохранения в это время на нагрузке напряжения, достаточного для образования искровых каналов (в данном случае более 40 В). Этому способствует увеличение емкости разрядного конденсатора и эквивалентного электрического сопротивления нагрузки, например, вследствие уменьшения напряжения импульсов, либо уменьшения числа параллельно включенных, либо увеличения числа последовательно включенных контактов в слое.

Наиболее существенно неосновные моды проявляются в режимах разряда конденсатора при $C = 200$ мкФ и более и $U_{C_0} = 110 \div 220$ В, особенно в случае использования принудительной механической активации слоя гранул [4]. При $U_{C_0} > 300$ В для описанных условий режим разряда конденсатора C становится близким к колебательному и относительная амплитуда неосновных мод тока существенно уменьшается.

Наличие мод в разрядном токе можно объяснить переключением каналов протекания тока между различными участками поверхности сосед-

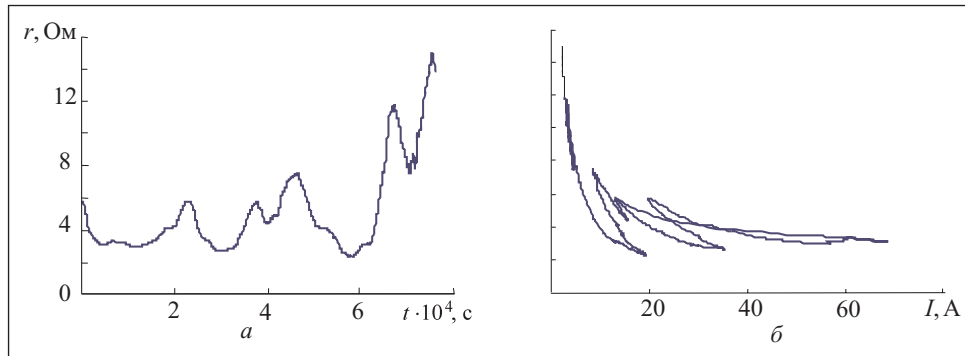


Рис. 2. Усредненные зависимости сопротивления среды от времени (а) и тока (б)

них гранул, образующих пару, либо от одной пары гранул к другой вследствие эрозии их приконтактных зон и эволюции искровых каналов. Заметим, что длительность неосновных мод в рассматриваемом случае составляет от нескольких десятков до сотни микросекунд, что свидетельствует о скоротечности даже усредненных процессов переключения каналов протекания тока в гранулированном слое.

Параметрическая зависимость усредненного эквивалентного электрического сопротивления гранулированной токопроводящей среды, полученного как частное напряжения на ней и тока в каждый момент времени, представлена на рис. 2. Как видим, данная зависимость, также как и зависимость, представленная на рис. 1, б, содержит моды, наличие которых объясняется описанными выше явлениями. Моды зависимости, приведенной на рис. 2, а, более выражены, чем моды зависимости, представленной на рис. 1, б, кроме того, проявляется тенденция увеличения сопротивления слоя на границах мод с течением времени.

Зависимость эквивалентного сопротивления среды от тока в ней, представленная на рис. 2, б, также содержит упомянутые моды. Кроме того, одним и тем же значениям тока соответствуют различные значения сопротивления, полученные в различные моменты времени, что приводит к наличию гистерезиса в рамках каждой моды. Следовательно, падение сопротивления до минимума и его последующее увеличение имеют различные траектории как для отдельных мод, так и в течение всего импульса тока.

Таким образом, можно констатировать, что сопротивление слоя в общем случае описывается нелинейно-параметрическими зависимостями и расчет переходных процессов в таких цепях неизбежно приводит к необходимости решения нелинейно-параметрических интегро-дифференциальных уравнений, которые относятся к наиболее сложному классу и,

как правило, не имеют точных аналитических решений. Возможность использования в частных случаях (исходя из преобладания соответствующих явлений) только одной (либо параметрической, либо нелинейной) зависимости сопротивления существенно упрощает расчеты.

Проанализируем физические явления, происходящие при прохождении тока в гранулированных токопроводящих средах. Вследствие существенного различия между электропроводностью металлических гранул и окружающей их жидкости, а также кривизны поверхности гранул, наибольшая плотность тока наблюдается в зонах электрических контактов между ними. Если между микровыступами гранул отсутствует омический контакт и существует тонкая прослойка рабочей жидкости, то в результате электрохимического действия тока в зонах контактов наблюдается интенсивное выделение газов, пузырьки которых образуют прослойку в некоторых из них.

Если в качестве рабочей жидкости использовать деионизованную воду, то в соответствующей зоне поверхности гранулы, потенциал которой выше (анод), чем потенциал соседней, контактирующей с ней гранулы (катод), выделяется газообразный кислород. В то же время в соответствующей зоне поверхности гранулы, являющейся катодом в данной паре, выделяется газообразный водород. При использовании водопроводной воды на аноде сначала выделяется хлор, и только когда ионов хлора в воде практически не остается, начинает выделяться кислород. Как свидетельствуют предварительные расчеты, в описываемых условиях вследствие электрохимического действия тока газовый промежуток длиной, превышающей длину свободного пробега электрона в нем в два раза и полностью покрывающий зону контакта, может образоваться за время приблизительно 10^{-7} с.

Если между микровыступами гранул существует омический контакт с высокой плотностью тока, то под действием джоулева тепла он может быть разрушен и на его месте образован паро-газовый пузырь за время 10^{-8} — 10^{-6} с, в зависимости от геометрических размеров, физических свойств материалов и используемой мощности.

Следовательно, образование в зонах контактов гранул газовых пузырей в обоих описанных случаях происходит за время в 100 — 10000 раз меньшее длительности одной моды импульса тока.

Под воздействием внешнего электрического поля образовавшийся газ существенно ионизируется и, как следствие, возникают электронные лавины, что, в конечном счете, приводит к возрастанию величины тока и образованию искровых каналов в течение 10^{-7} с [18]. На стадии образования и развития искра имеет отрицательное дифференциальное сопротивление, обусловленное преобладанием процессов ионизации над про-

цессами рекомбинации заряженных частиц и расширением канала. При этом ток в канале возрастает. Через некоторое время температура в зонах гранул, граничащих с плазменным каналом, повышается настолько, что становится возможной термоэлектронная эмиссия и переход несамостоятельного разряда в самостоятельный. Заметим, что данное явление обладает некоторой инерционностью.

Быстрое расширение искрового канала приводит к снижению температуры в его внешних областях и, как следствие, преобладанию процессов рекомбинации над процессами ионизации, уменьшению концентрации заряженных частиц, спаду тока и исчезновению канала при определенных условиях. На стадии уменьшения силы тока дифференциальное сопротивление канала положительно. Процессы рекомбинации свободных носителей зарядов происходят медленнее, чем процессы их генерации в данных условиях [18, 19]. Кроме того, с течением времени наблюдается эрозия приконтактных зон искрового промежутка, что оказывает существенное влияние на процессы, протекающие в искровом канале и, как следствие, на его сопротивление. Наличие инерционных свойств обуславливает параметрический характер рассматриваемых процессов, а различия в их характеристиках — использование как минимум двух функций для их описания.

Если энергии емкостного накопителя достаточно для инициирования нового искрового канала после исчезновения предыдущего, вызванного описанными выше процессами, то с высокой вероятностью новый канал возникнет между двумя другими областями того же контакта. В слое гранул он может возникнуть как между теми же гранулами, так и между другими. Таким образом, в слое происходит миграция искровых каналов по поверхности гранул, что способствует появлению мод в параметрических зависимостях сопротивления слоя и тока в нем.

Следует заметить, что возникновение и исчезновение искровых каналов в слое гранул происходит несинхронно, однако в определенные моменты времени преобладают либо процессы генерации, либо процессы рекомбинации свободных носителей заряда в них. Построенные по осциллограммам зависимости (см. рис. 2) отражают интегральные процессы, происходящие в слое гранул. Из полученных зависимостей (см. рис. 1) следует, что основная часть энергии разрядного импульса рассеивается в слое гранул в течение первой моды тока. Характер процессов, протекающих в слое в течение последующих мод тока, в целом остается прежним, а меняются лишь их начальные условия. Поэтому анализ процессов, происходящих в течение первой моды тока, имеет основное значение.

Для аппроксимации параметрической зависимости сопротивления слоя в рамках первой моды тока используем функцию вида

$$r_a = r_0 + r_1 + r_2 = r_0 + A_1 \exp(-a_1 t) + A_2 \exp(a_2 t). \quad (2)$$

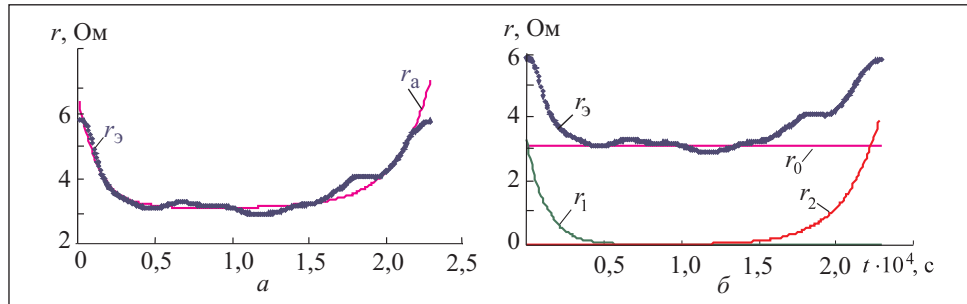


Рис. 3. Экспериментальная $r_э$, аппроксимирующая $r_а$ зависимости (а) и составляющие r_0 , r_1 , r_2 аппроксимирующей зависимости (б) сопротивления среды от времени

Выбор экспоненциальных функций обусловлен тем, что процессы ионизации, рекомбинации, развития лавин и прорастания стримеров описываются такими функциями [18]. Значения параметров аппроксимации, найденные по критерию наименьшей средней суммы модулей относительных погрешностей $|\delta|_{cp}$, для рассматриваемого случая следующие:

$$r_0 = 3,119656113 \text{ Ом}; \quad A_1 = 3,386909436 \text{ Ом}; \quad a_1 = 80000,00007 \text{ 1/с}; \\ A_2 = 0,000184211 \text{ Ом}; \quad a_2 = 43499,99967 \text{ 1/с}; \quad |\delta|_{cp} = 3,853804906 \%$$

На рис. 3 приведены графики экспериментальной и аппроксимирующей параметрических зависимостей сопротивления среды и графики зависимости от времени слагаемых соотношения (2). Слагаемое r_0 характеризует сопротивление гранулированной токопроводящей среды в акматической фазе развития большинства искровых каналов, когда степень их ионизации близка к максимальной. Слагаемое r_1 учитывает процессы генерации свободных носителей в большинстве искровых каналов на стадии их развития, предшествующей акматической фазе. Его величина характеризует уменьшение общего сопротивления среды в моменты времени от начала протекания тока до достижения им максимальных значений. Слагаемое r_2 учитывает процессы рекомбинации свободных носителей в большинстве искровых каналов на временном интервале после акматической фазы их развития и до исчезновения.

Выводы

1. Зависимости сопротивления гранулированных токопроводящих сред в процессе их искроэрозивной обработки в общем случае являются нелинейно-параметрическими, что делает крайне сложным анализ переходных процессов в них аналитическими методами.

2. При малых значениях токов в таких средах и большой длительности аperiодических переходных процессов более существенно проявляются параметрические свойства их сопротивления.

3. Преимуществом параметрических зависимостей, описывающих такие сопротивления, является однозначность и отсутствие гистерезисов во всем диапазоне изменения аргумента.

4. Предложенная параметрическая модель сопротивления описывает фазы возникновения, развития и угасания искровых каналов, обусловленные динамикой генерации и рекомбинацией свободных носителей заряда в них.

The model of equivalent electric resistance of the granulated current-conducting mediums at their spark-erosional processing has been created on the basis of experimental data and analysis of physical processes in such mediums. The offered model considers the phases of occurrence, development and fading of spark channels which, in turn, are caused by dynamics of generation and recombination of free charge carriers in them.

1. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Захарченко С. Н. Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ. Електротехніка' 2001. — Київ : Вид. Ін-ту електродинаміки НАНУ, 2001. — С. 3—16.
2. 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: Зб. наук. пр. — Київ: ІЕД НАНУ. — 2009. — № 22. — С. 74—79.
3. Щерба А. А., Захарченко С. Н., Яцюк С. А. и др. Развитие систем получения ультрадисперсных искроэрозионных порошков: влияние вибрации на параметры разрядных импульсов и характеристики продукции // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Проблеми сучасної електротехніки». — 2008. — Ч. 4.— С. 107—112.
4. Щерба А. А., Захарченко С. Н., Яцюк С. А. и др. Анализ методов повышения эффективности электроэрозионной коагуляции при очистке водных сред // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». — 2008. — Ч. 2. — С. 120—125.
5. Муратов В. А. Полупроводниковые преобразователи для питания технологических аппаратов электроэрозионного диспергирования: Дис... канд. техн. наук. — Киев, 1986. — 279 с.
6. Захарченко С. Н., Фастова С. С. Аппроксимация зависимостей от времени напряжения и тока разрядных импульсов в гранулированных токопроводящих средах для экспресс определения их эквивалентного сопротивления и мощности импульсов // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». — 2010. — Ч. 2. — С. 87—90.
7. Шидловский А. К., Супруновская Н. И. Энергетические процессы в электрических цепях разрядноимпульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку и ненулевых условиях его заряда // Технічна електродинаміка. — 2010. — № 1. — С. 42—48.
8. Подольцев А. Д., Супруновская Н. И. Моделирование и анализ электроразрядных процессов в нелинейной RLC цепи // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Проблеми сучасної електротехніки». — 2006. — Ч. 4. — С. 3—8.

9. Захарченко С. Н., Чибелис В. И., Бурлака В. П. Моделирование переходного процесса в разрядном контуре технологической установки объемного электроискрового диспергирования металлических гранул // Доп. за матеріалами МНТК МУАС «Сучасні проблеми електроенерготики та автоматики». — Київ: Політехніка, 2009. — Т. 2. — С. 386 — 389.
10. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. — М.: Энергия, 1968. — 504 с.
11. Пат. № 72324 Україна, МПК В22F 9/14, 1/02. Установка для электроэрозийного диспергирования металлов/О. Є. Божко, А. О. Тарелін, О. І. Федоров та ін. — Оpubл. 15.02.2005. Бюл. № 2.
12. А. С. № 663515 СССР, МПК В23P1/02. Устройство для электроэрозийного диспергирования металлов/Л. П. Фоминский. — Оpubл. 25.05.1979. Бюл. № 19.
13. Пат. № 2001719 РФ, МПК В22P9/14. Устройство для электроэрозийного диспергирования металлов в насыпном слое/Л. П. Фоминский. — Оpubл. 30.10.1993. Бюл. № 39—40.
14. Пат. № 38461 Україна, МПК (2006) В22F 9/08. Пристрій для отримання колоїдних розчинів ультрадисперсних порошків металів/К.Г. Лопатько, Є. Г. Афтандіянц, А. А. Щерба та ін. — Оpubл. 12.01.2009. Бюл. № 1.
15. 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: Зб. наук. пр. — Київ: ІЕД НАНУ, 2010. — № 25. — С. 133—139.
16. 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.
17. Захарченко С. М., Шевченко С. М., Перегиняк С. М., Фастова С. С. Комплекс віддаленого контролю параметрів процесу об'ємної електроіскрової обробки гетерогенних струмопровідних середовищ у режимі реального часу // Наук. вісн. Національного університету біоресурсів і природокористування України. — Київ: НУБіПУ, 2010. — Вип. 148. — С. 162—167.
18. Райзер Ю. П. Физика газового разряда: Учеб. руководство. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 592 с.
19. Акишев Ю. С., Апонин Г. И., Грушин М. Е. и др. О развитии искры в азоте, поддерживаемой зарядкой паразитной емкости внешней цепи // Физика плазмы. — 2007. — 33. — №7. — С. 642—660.

Поступила 06.07.12

ЗАХАРЧЕНКО Сергей Николаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та электродинамики НАН Украины. В 1996 г. окончил Национальный технический университет Украины «КПИ». Область научных исследований — электротехнические комплексы искроэрозийной обработки гетерогенных токопроводящих сред.

ШИДЛОВСКАЯ Наталья Анатольевна, чл.-кор. НАН Украины, д-р техн. наук, гл. науч. сотр. Ин-та электродинамики НАН Украины. В 1986 г. окончила Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — нелинейные и параметрические электрические цепи.

