

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

И.В. Божко, канд. техн. наук, **С.Н. Захарченко**, канд. техн. наук, **А.Н. Карлов**, канд. техн. наук, **И.П. Кондратенко**, докт. техн. наук, **А.П. Ращепкин**, докт. техн. наук, **Н.И. Фальковский**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины

пр. Победы, 56, 03680, Киев-57, Украина

E-mail: dep7ied@ukr.net

Изложены методы анализа и представлены основные научные результаты исследований электромагнитных процессов в технологических системах обработки материалов, полученные отделом электромагнитных систем в 2013 году. Библ. 25, рис. 10.

Ключевые слова: синхронный перемешиватель жидкого металла в кристаллизаторе, импульсный коронный разряд, электроэрозионная обработка.

В 2013 году отдел электромагнитных систем проводил научные исследования в соответствии с рабочими планами по темам «Стример», «Объект-2» и «Сигма-ШЗ», охватывающим основные направления научной деятельности отдела:

- развитие теории и методов анализа электромагнитных процессов в электротехнических системах;
- исследование электрических, магнитных и электрофизических явлений и процессов в средах с различными физическими свойствами;
- исследование закономерностей протекания электротермических и силовых процессов при комплексном взаимодействии электромагнитных и тепловых полей в средах с различными физическими свойствами;
- разработка и совершенствование математических моделей электротехнических устройств и методик расчета их электрических параметров и энергетических показателей;
- теоретическое и экспериментальное исследования объемного импульсного электрического разряда атмосферного давления и создание на его основе эффективных технологий;
- разработка плазмохимических реакторов для генерации химически активных веществ импульсным высоковольтным разрядом;
- разработка электротехнических систем для реализации плазменно-эрозионных процессов в гетерогенных средах и создание новых технологий на их основе.

Кроме основных тем фундаментальных и прикладных исследований в отделе проводились работы по комплексным программам научных исследований НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (РЕСУРС)» и «Фундаментальні проблеми наноструктурних систем, наноматеріалів, нанотехнологій».

В статье выполнен краткий обзор основных научных результатов, полученных за отчетный период.

Электромагнитные поля в электромагнитной системе синхронного перемешивателя жидкого металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок с использованием постоянных магнитов. В мировой практике, несмотря на дополнительные энергетические затраты, все более широко применяется электромагнитное перемешивание жидкого металла в кристаллизаторах, позволяющее бесконтактным способом воздействовать на жидкий металл. Обычно для этих целей используется статор двух- либо трехфазного асинхронного двигателя, возбуждающего в области жидкого металла вращающееся магнитное поле. Его силовое действие приводит к вращательному движению металла и, в результате, его интенсивному перемешиванию, что способствует повышению теплообменных процессов и улучшению структуры металла.

Вследствие большого воздушного зазора, практически равного диаметру расточки статора, для возбуждения магнитной индукции в области жидкого металла на экспериментально установленном уровне 0,067 Тл требуется значительная токовая нагрузка статора. Это приводит к тому, что даже при обычно используемой частоте тока в обмотке порядка 5 Гц мощность преобразователя частоты достигает величины 60 кВА. При этом потребляемая активная мощность не превышает 10 кВт, причем активная составляющая электромагнитной мощности составляет 5 кВт, а потери в обмотке – 5 кВт. Поэтому представляется обоснованным возбуждать требуемое магнитное поле магнитной системой на постоянных магнитах, вращение которой с заданной частотой обеспечивается клиноременной или зубчатой передачей от двигателя мощностью 10 кВт. Известно также совмещенное, блочное исполнение такой магнитной системы с асинхронным приводом, в котором массивное ферромагнитное ярмо магнитной системы с медным покрытием является ротором асинхронного двигателя. Достоинством такой системы является возможность на диаметре расточки статора, приблизительно равном 0,5 м, выполнить многополюсный двигатель и питать его от трехфазной промышленной сети. Недостатком такого исполнения является необходимость применения специальных мер охлаждения постоянных магнитов от тепловыделений в роторе индуцированными в ярме токами, поскольку при превышении определенной температуры они теряют намагниченность.

Если же ярмо 2р-полюсной магнитной системы на постоянных магнитах выполнить из неферромагнитной стали и поместить ее внутри статора с обмоткой таким же количеством пар полюсов, то магнитный поток постоянных магнитов будет замыкаться по железу статора. Такое конструктивное исполнение представляет собой синхронный двигатель с полым ротором, внутри которого размещается кристаллизатор. При этом отпадает необходимость охлаждения ротора, так как в нем отсутствуют тепловыделения. В таком исполнении перемешивателя вращающееся магнитное поле в области кристаллизатора возбуждается суммарным действием постоянных магнитов и токов обмотки статора.

На основе предложенного модельного представления кристаллизатора разработан метод расчета распределения результирующего магнитного поля в конструктивных элементах кристаллизатора непрерывного литья заготовок, создаваемого системой возбуждения на постоянных магнитах и токами статорной обмотки синхронного магнитоэлектрического перемешивателя, выполненного в виде двухполюсного синхронного двигателя с полым ротором.

Особенностью расчета магнитного поля в кристаллизаторе является непостоянство скорости вращения жидкого металла по радиусу, что приводит к необходимости использования итерационных методов расчета скорости жидкого металла. Для этого на основе условий сопряжения сформулированы граничные условия на поверхности жидкого металла при произвольной функциональной зависимости скорости движения металла, которые используются в итерационном процессе определения магнитного поля и его силового воздействия.

Исследования статистических параметров сопротивления гранулированных токопроводящих сред и электрических импульсов в них. Объемная электроэрозионная обработка гранул металлов и сплавов, погруженных в слабопроводящую охлаждающую жидкость, на протяжении более 20 лет является технологической основой процессов производства дисперсных порошков тугоплавких (*Pt-Ro, W*), магнитных (*Fe-B-Si, Ni-Mn-Ga*), многокомпонентных водородсорбирующих (*Ti-Zr-Ni, Ti-Ni-Zr-Cu*) и других сплавов специального назначения. В последнее время модификация данного метода с использованием принудительной механической активации слоя гранул позволила получить стойкие к седиментации гидрозоль биоцидных (*Ag, Cu, Zn*) и биогенных (*Fe, Co, Mn, Mo*) металлов для дальнейшего их применения в растение- и животноводстве. Специальные режимы электроэрозионной обработки слоев гранул *Al*, погруженных в воду, реализуют процессы очистки и обеззараживание водных потоков. При этом эрозионные мелкодисперсные частички *Al* в результате химического взаимодействия с водой образуют $Al(OH)_3$, который в результате дальнейшей гидратации становится высокоактивным коагулянтom – основным фактором удаления из воды ионов тяжелых металлов, а также ряда органических и неорганических загрязнений.

Параметры разрядных импульсов и технологические условия процессов в значительной мере влияют на структурно-фазовое состояние и распределение по размерам электроэрозионных частичек металлов и сплавов, то есть на качество продуктов процесса. В свою очередь, существует взаимная зависимость эквивалентного электрического сопротивления погруженных в рабочую жидкость слоев металлических гранул и параметров разрядных импульсов, которая затрудняет их стабилизацию с целью повышения качества продукции и уменьшения материало- и энергоемкости процессов. Поэтому исследование электрических параметров гранулированных токопроводящих сред и разрядных импульсов является актуальной и важной задачей.

Слой металлических гранул в рабочей жидкости при прохождении в нем импульсов тока с точки зрения электротехники является сложной нелинейно-параметрической нагрузкой, сопротивление которой может стохастично изменяться в несколько раз даже в рамках продолжительности одного импульса. Моделирование и оптимизация переходных процессов в электрических цепях с такой нагрузкой являются сложной задачей, которая в определенных случаях вообще не может быть решена с помощью лишь аналитических методов. Эквивалентное электрическое сопротивление слоя металлических гранул может быть представлено как параметрическими, так и нелинейными элементами.

Статистические исследования зависимости эквивалентного электрического сопротивления гетерогенных токопроводящих сред при их электроэрозионной обработке от напряжения разрядных импульсов приведены в литературе. Целью таких исследований является статистический анализ стохастических изменений эквивалентного электрического сопротивления гранулированных сред, а также напряжения и тока разрядных импульсов.

Методика исследований, оборудование и материалы. Методика состояла в проведении прямых экспериментов на лабораторном оборудовании, оцифровывании и запоминании массивов синхронных осциллограмм напряжения на нагрузке и тока в ней и их статистической обработке. В состав лабораторной установки входили: генератор разрядных импульсов (ГРИ), блок управления генератором, разрядная камера с алюминиевыми гранулами и аналого-цифровой запоминающий осциллограф HAMEG HM 1507-3, подключенный к персональному компьютеру. К осциллографу были подключены делитель напряжения 1:10 и высокочастотный измерительный трансформатор тока. В состав ГРИ входил управляемый выпрямитель, подключенный к однофазной сети электропитания напряжением 220 В, который обеспечивал на опорной батарее конденсаторов $C_{оп}$ стабилизированное постоянное напряжение $U_{оп}$.

Через зарядный тиристор и дроссель рабочий конденсатор C заряжался от опорного конденсатора $C_{оп}$ до напряжения, которое превышало опорное $U_{оп}$ приблизительно в 1,7 раза. Емкость рабочего конденсатора C составляла 100 мкФ, а эквивалентная индуктивность разрядного контура $L=1,5$ мкГн. Во избежание аварийных ситуаций, связанных со стохастическим изменением сопротивления гранулированной токопроводящей среды в широких пределах, разрядная камера была зашунтирована резистором сопротивлением 3 Ом. В экспериментах использовались гранулы Al марки AE квазисферической формы диаметром $d=4$ мм, поверхность которых прошла предварительную искроэрозионную обработку. Длина слоя гранул между электродами составила $l=56$ мм, ширина $b=22$ мм, а высота $h=25$ мм. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода с удельным электрическим сопротивлением в начале процесса $\rho_F=25$ Ом·м. Высота воды в разрядной камере была 100 мм. С целью исключения влияния гидродинамических сил на эквивалентное электрическое сопротивление слоя гранул в процессе измерений ее проток отсутствовал. В паузах между сериями измерений продукты эрозии периодически вымывались водным потоком, после чего он отключался.

При оцифровывании осциллограмм HAMEG HM 1507-3 в рамках одного импульса число равных промежутков дискретизации времени составляло 2048. Импульсы, частота f которых равнялась 5 Гц, запоминались через каждые 5 с по сигналу триггера осциллографа в течение пяти мин для каждого значения опорного напряжения. Таким образом, для каждого

режима было снято 60 осциллограмм. Низкое значение частоты повторения импульсов было выбрано с целью исключения ее влияния на эквивалентное электрическое сопротивление среды. Продолжительность импульса определяли как промежуток времени между значениями тока на уровне 0,1 от его амплитуды по переднему и заднему фронтам. По данным каждой осциллограммы определялись амплитуды напряжения U_m , тока I_m , а также эквивалентного активного сопротивления нагрузки в течение продолжительности одного импульса:

$$R_E = \sum_{j=1}^m i_j \cdot u_j / \sum_{j=1}^m i_j^2, \quad (1)$$

где i_j – значение тока в конкретный момент времени t_j , А; u_j – значение напряжения в момент времени t_j , В; m – количество интервалов дискретизации длительности импульса.

Полученные в результате эксперимента и расчетов значения электрического сопротивления, напряжения и тока импульсов подвергались статистическому анализу. Математические ожидания сопротивления R_E , амплитуд напряжения U_m и тока I_m вычисляли по формуле

$$M[x] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad (2)$$

где x_j – элемент массива; n – число элементов в массиве.

Дисперсию этих переменных вычисляли согласно

$$D[x] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - M[x])^2. \quad (3)$$

Коэффициент вариации $\nu[x]$ и относительное среднее линейное отклонение от математического ожидания $\bar{\delta}[x]$ вычисляли соответственно:

$$\nu[x] = \sqrt{D[x]} / M[x]; \quad (4)$$

$$\bar{\delta}[x] = \sum_{j=1}^n |d_j - M[x]| / M[x] \cdot n. \quad (5)$$

Результаты исследований и их анализ. Зависимость математического ожидания (2) эквивалентного электрического сопротивления слоя гранул (1) $M[R_E]$ от опорного напряжения (рис. 1) носит гиперболический характер, что согласуется с полученными ранее данными. Зависимость дисперсии (3) электрического сопротивления $D[R_E]$ от опорного напряжения (рис. 1) также может быть аппроксимирована гиперболическими функциями. Зависимости коэффициентов вариации (4) эквивалентного сопротивления нагрузки $\nu[R_E]$, амплитуд напряжения $\nu[U_m]$ и тока $\nu[I_m]$ разрядных импульсов, а также их относительных средних линейных отклонений от математического ожидания (5) $\bar{\delta}[R_E]$, $\bar{\delta}[U_m]$ и $\bar{\delta}[I_m]$ от опорного напряжения представлены на рис. 2–4 соответственно. Из рис. 2–4 видно, что наименьшие значения имеют коэффициенты вариации и относительные средние линейные отклонения от математического ожидания амплитуд напряжения, а наибольшие – от эквивалентного сопротивления, что характеризует их разброс.

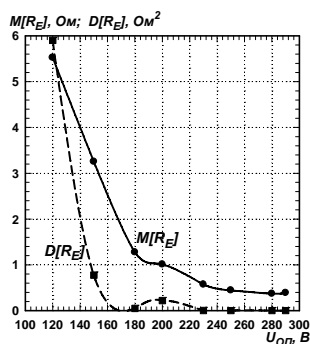


Рис. 1

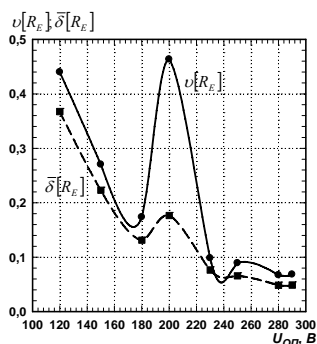


Рис. 2

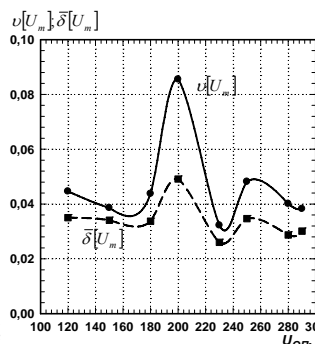


Рис. 3

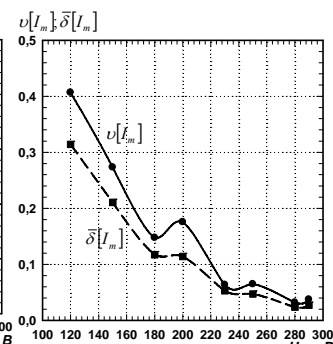


Рис. 4

Это означает, что в данных режимах нагрузочная характеристика генератора ближе к характеристике источника электродвижущей силы, а не источника тока. На всех трех графиках (рис. 2–4) наблюдаются локальные экстремумы $\nu[x]$ и $\bar{\delta}[x]$ при опорном напряжении 200 В, что свидетельствует о самой большой нестабильности данного режима.

Поскольку погрешность определения эквивалентного активного сопротивления состоит из большого числа погрешностей, каждая из которых не является большой, то на основе центральной предельной теоремы в качестве нулевой гипотезы принято, что R_E имеет нормальное распределение. Построенная согласно данным экспериментов гистограмма распределения отношения количества попаданий n_j значений эквивалентного электрического сопротивления нагрузки R_E в интервал j к общему количеству значений R_E в рамках одного режима (при опорном напряжении 290 В) $n=40$ приведена на рис. 5. Для сравнения на гистограмму рис. 5 наложена пронормированная по $n=40$ функция плотности нормального закона распределения случайной величины с параметрами $M[R_E]=0,388$ Ом и $D[R_E]=6,84 \cdot 10^{-4}$ Ом², которые рассчитаны по данным экспериментов по (2) и (3) соответственно. Из этого рисунка следует, что распределение плотности значений R_E с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть описано нормальным законом.

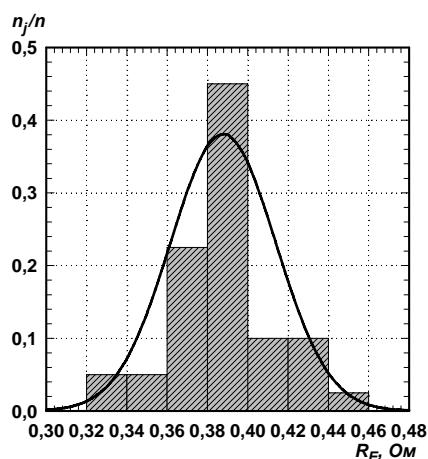


Рис. 5

Выводы. 1. Показано, что при фиксированном значении опорного напряжения распределение среднего за время длительности импульса тока значения эквивалентного электрического сопротивления гранулированной токопроводящей среды подчиняется нормальному закону.

2. Зависимости математического ожидания и дисперсии эквивалентного сопротивления среды от напряжения могут быть аппроксимированы гиперболическими функциями. То есть с ростом опорного напряжения их значения уменьшаются, что свидетельствует о повышении стабильности процесса с ростом напряжения импульсов в исследованном диапазоне.

3. Максимальные значения коэффициентов вариации наблюдаются для эквивалентного электрического сопротивления среды, а минимальные — для амплитуды напряжения. Это свидетельствует о том, что в исследованных режимах нагрузочная характеристика генератора импульсов была более близкой к характеристике источника электродвижущей силы, чем к характеристике источника тока, а первопричиной стохастических изменений электрических параметров системы являются свойства сопротивления гранулированных токопроводящих сред.

4. Режим работы при значении опорного напряжения 200 В является наиболее нестабильным среди всех исследованных, о чем свидетельствуют локальные экстремумы коэффициента вариации и относительного среднего линейного отклонения от математического ожидания для электрического сопротивления среды, напряжения и тока импульсов.

4. Режим работы при значении опорного напряжения 200 В является наиболее нестабильным среди всех исследованных, о чем свидетельствуют локальные экстремумы коэффициента вариации и относительного среднего линейного отклонения от математического ожидания для электрического сопротивления среды, напряжения и тока импульсов.

Разработка источника питания для импульсных электроразрядных технологий обработки воды. Питьевая, техническая и сточная воды требуют очистки, поэтому существует насущная необходимость усовершенствования известных и создания новых методов обработки. Анализ современной литературы свидетельствует, что среди известных методов обработки одними из перспективных являются электроразрядные методы, среди которых основное место занимает обработка импульсными разрядами. Это связано с тем, что обработка на импульсных разрядах более энергоэффективна по сравнению с обработкой на постоянном токе. В импульсных электроразрядных технологиях использование разряда на поверхность воды по сравнению с различными видами подводных разрядов является более целесообразным, так как для него гораздо меньше удельные энергозатраты и значительно больший ресурс электродных систем. Для создания такого разряда нужны источники питания высоковольтных (20...30 кВ) импульсов с крутизной фронтов $10^{11} \dots 10^{12}$ В/с, длина которых состав-

ляет 100...200 нс. Частота следования этих импульсов должна быть $10...10^3$, а энергия – 0,01...1 Дж. Импульсные генераторы отличаются схемными решениями и типами ключей, которые в них используются.

В последнее время появился ряд экспериментальных работ, в которых рассматривается использование SOS-диодов в генераторах импульсов. Из них следует, что характеристики выходного импульса на нагрузке существенно зависят от соотношения параметров элементов разрядной цепи, в которую входит SOS-диод. Но поскольку выполненные ранее исследования имеют экспериментальный характер и относятся к генераторам для питания коронного разряда, то при разработке генераторов импульсов для питания барьерного разряда существует необходимость более детального анализа путем моделирования влияния элементов электрической схемы на параметры импульсов в нагрузке. Поэтому целью данной работы являются моделирование импульсного генератора и исследование влияния изменения параметров цепи на выходные характеристики генератора, а также определение условий, при которых он обеспечивает высоковольтные импульсы с амплитудой до 30 кВ, с фронтами не более 50 нс и длиной около 100 нс, то есть с параметрами, которые нужны для создания эффективного импульсного барьерного разряда.

На рис. 6 показана эквивалентная схема импульсного генератора с SOS-диодом, которая использовалась при расчетах. В этой схеме C – конденсатор, K – ключ, L – индуктивность, VD – диод, R_1 – сопротивление, которое включает активные сопротивления ключа K и индуктивности L , R_2 – сопротивление нагрузки. Ключом K в условиях этой работы служил газонаполненный разрядник, сопротивление которого при увеличении через него тока в пределах 10...300 А уменьшается примерно от 10 до 5 Ом. Активное сопротивление индуктивности L , которое использовалось при расчетах, не превышало 0,3 Ом.

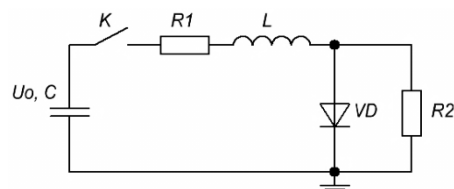


Рис. 6

Схема работает следующим образом. Конденсатор C , предварительно заряженный до напряжения U_0 , после замыкания ключа K сначала за время T_n (рис. 7, кривая 1), перезарядается через индуктивность L и диод VD . После того как конденсатор перезарядился, ток меняет направление в цепи и в течение времени T_r диод не влияет на его прохождение. За это время в L накапливается индуктивная энергия. После чего за счет восстановления обратного сопротивления диода ток начинает обрываться. Время этого обрыва составляет T_o . После этого на диоде возникает высоковольтный импульс напряжения (рис. 7, кривая 2), который прикладывается к нагрузке R_2 .

На рис. 7 показаны результаты моделирования зависимости от времени t тока через диод $i_d(t)$ (кривая 1) и напряжения $U_d(t)$ (кривая 2) на нем. Расчеты выполнены в программной среде Micro - Cap при параметрах $C = 700$ пФ, $U_0 = 13,5$ кВ, $L = 10$ мкГн, характерных для предыдущих исследований, и касались разработки генераторов для питания импульсного коронного разряда. Для того чтобы на первом этапе моделирования отойти от импеданса разрядной камеры, который обычно лежит в широком диапазоне значений (50...10000 Ом),

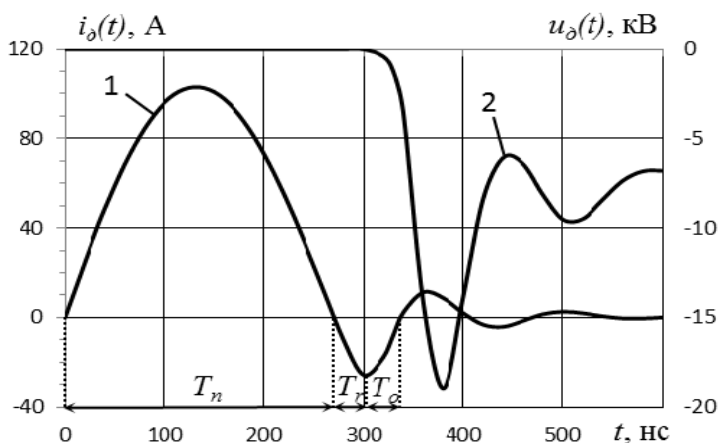


Рис. 7

величина R_2 была принята равной 1000 Ом. Считалось, что $R_1 = 10$ Ом. При моделировании использовались известные параметры SOS-диода типа SKR31F12, которые были включены последовательно в количестве 30 единиц. Оказалось, что амплитуда импульса напряжения на нагрузке U_d (кривая 2, рис. 7) составляет 19 кВ и по сравнению с напряжением U_0 в полтора раза больше. За величину T_ϕ принималось время, за которое импульс

достигал 90 % от амплитудного значения U_0 . T_{50} – величина, которая определяет длину импульса на половине его амплитудного значения (в зарубежной литературе принято сокращение этого термина FWHM (Full - wide - half - maximum)). Определено, что при длине фронта импульса $T_\phi \approx 45$ нс его длина T_{50} составляет ≈ 70 нс. Таким образом, крутизна фронта импульса составляет $\Delta u/\Delta t \approx 2 \cdot 10^{11}$ В/с, что является приемлемым для эффективного использования импульсного барьерного разряда. Моделирование показало, что напряжение U_d практически линейно зависит от напряжения заряда конденсатора U_0 . Например, при $U_0 = 27$ кВ $U_d = 37$ кВ. Поэтому все дальнейшие расчеты выполнены при одном и том же напряжении $U_0 = 13,5$ кВ, при необходимости выходное напряжение на нагрузке можно повысить за счет увеличения напряжения U_0 .

Важным показателем генератора импульсов кроме параметров U_d , T_ϕ и T_{50} является также коэффициент передачи энергии, который определяется по формуле

$$\eta = \frac{W_{R2}}{W_C} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $W_C = (C \cdot U_0^2) / 2$ – накопленная энергия в конденсаторе C ; W_{R2} – энергия, которая передана в нагрузку R_2 за все время t действия импульса тока, проходящего через сопротивление R_2 :

$$W_{R2} = \int_0^t \frac{u_d^2(t)}{R_2} dt. \quad (7)$$

Результаты предыдущих работ и предварительного моделирования показали, что параметры генератора импульсов существенно зависят от индуктивности, приемлемыми значениями которой являются L до 40 мкГн. Поэтому, чтобы определиться с оптимальными параметрами L , было проведено моделирование ($C=700$ пФ, $R_1=10$ Ом, $R_2=1000$ Ом) при индуктивностях в диапазоне от 0,5 до 40 мкГн. На рис. 8 изображены зависимости относительного напряжения U_n^* на нагрузке R_2 (кривая 1), которое определялось по выражению

$$U_n^* = \frac{U_n}{U_0} \cdot 100\%, \quad (8)$$

коэффициент η (кривая 2) и величины T_ϕ , T_{50} (кривые 4 и 3 соответственно) от значения L . Из рисунка видно, что с возрастанием L , напряжение U_n^* достигает максимума при $L \approx 5$ мкГн, а дальнейшее увеличение индуктивности его уменьшает. Коэффициент η также стремительно повышается с увеличением индуктивности до 5 мкГн, но в дальнейшем темп его возрастания значительно меньше. С ростом индуктивности длина импульса напряжения T_{50} увеличивается от 10 до 150 нс, а его фронт T_ϕ – от 10 до 90 нс.

Приведенные на рис. 8 зависимости позволяют установить параметры индуктивности L , при которых величины U_n^* , η , T_ϕ и T_{50} являются приемлемыми. Они лежат в диапазоне от 5 до 10 мкГн. В этих условиях $T_\phi < 50$ нс, $T_{50} < 60$ нс, $U_n^* \approx 140\%$, $\eta \approx 75\%$, которые являются приемлемыми условиями использования такого источника питания для создания эффективного импульсного барьерного разряда.

Величина C также оказывает существенное влияние на выходные параметры

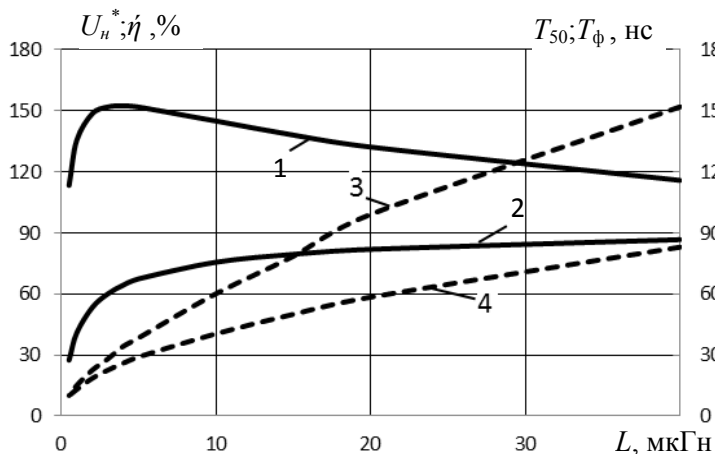


Рис. 8

генератора импульсов. Прежде всего нужно учитывать, что эта емкость является первичным накопителем энергии и от нее зависит энергия, которая передается в нагрузку за время прохождения импульса. Как правило, эту энергию можно повысить за счет увеличения напряжения U_0 , не увеличивая величину C . Но с технологических и практических соображений это не всегда целесообразно. Поэтому было бы желательно достичь нужного технологического ре-

зультата, с учетом комплекса всех требований, благодаря выбору величины емкости C . Расчеты показали, что с изменением значений C от 300 до 2100 пФ при индуктивности $L = 10$ мкГн, величина η уменьшается от 81 до 62 %. Наибольшее значение $\eta \approx 81$ % соответствует $C = 300$ пФ. Но при уменьшении C до такой величины, примерно в 7 раз снижается величина энергии, которую можно передать в нагрузку. В то же время следует учитывать, что увеличение C , кроме уменьшения η , приводит к нежелательному приросту временных параметров T_ϕ и T_{50} . Поэтому выбор величины C должен быть ориентированным на конечный результат – достижения наибольшей энергоэффективности электроразрядной технологии обработки воды с учетом экономичности источника питания в целом.

Следующим шагом было определение влияния сопротивлений R_1 и R_2 на коэффициент η и выходное напряжение U_n^* . Моделирование проводилось с параметрами цепи $C = 700$ пФ, $L = 10$ мкГн. При возрастании сопротивления R_2 коэффициент η в обоих случаях увеличивается, но после достижения величины R_2 около 200 Ом изменения становятся незначительными. Что касается выходного напряжения U_n^* , то с увеличением сопротивления R_2 оно возрастает с 30 до 145–155 %. Очевидно, что сопротивление ключа R_1 требует особого внимания, так как даже при незначительном воздействии на выходное напряжение U_n^* , оно имеет значительное влияние на изменение коэффициента η . При уменьшении сопротивления R_1 с 10 до 5 Ом, коэффициент η повышается с 75 до 86 % (более чем на 10 %).

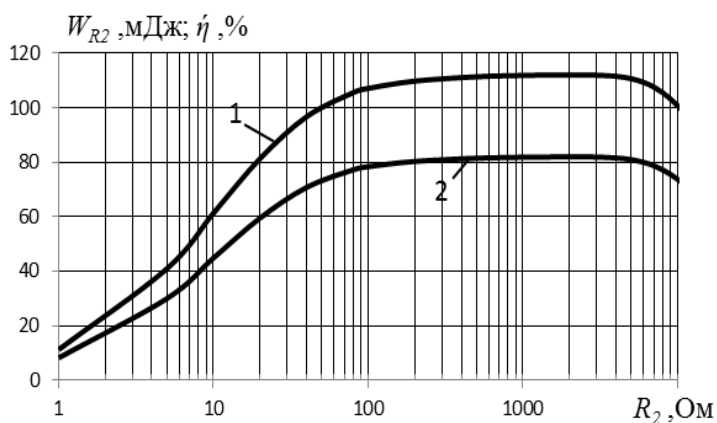


Рис. 9

Понятно, что при разработке генератора импульсов, важными параметрами являются не только величины U_n^* и η , но и сама величина энергии W_{R2} , передаваемая в нагрузку. Обычно обработка воды импульсным барьерным разрядом в исследовательских установках проводится при энергиях импульсов от десятков до 1...2 сотен миллиджоулей. Достижение таких энергий, как уже отмечалось, становится возможным при увеличении напряжения U_0 и емкости C в схеме, которая представлена на рис. 6. Однако при практическом использовании таких источников питания в электроразрядных технологиях по экономическим и техническим причинам обработку воды желательно было бы вести при напряжениях U_0 до 20 кВ. Кроме этого энергия, выделяемая в нагрузке, зависит от его сопротивления. Исходя из этих обстоятельств, было исследовано влияние величины R_2 на эффективность передачи энергии η и энергию W_{R2} в условиях, когда $U_0 = 13,5$ кВ. Выбор для этого моделирования величин $L = 10$ мкГн, $C = 1500$ пФ, $R_1 = 5$ Ом обусловлен тем, что, как показало предварительное моделирование, при таком соотношении этих параметров можно обеспечить передачу в нагрузку энергии >100 мДж. Значение $W_{R2} = 100$ мДж выбрано как величина, которая находится в середине диапазона энергий импульса, при которых ведется обработка воды в исследовательских установках. Результаты вычислений при этих условиях показаны на рис. 9. На нем изображены зависимости величин энергии W_{R2} (кривая 1) и коэффициента η (кривая 2) от величины сопротивления нагрузки R_2 . Из рисунка видно, что при росте R_2 до 100 Ом значения W_{R2} и η увеличиваются соответственно до 110 мДж и 80 %. Дальнейший рост R_2 до 4000 Ом практически не влияет на эти величины. Из результатов моделирования следует, что обработку воды энергетически выгодно вести при условиях, когда импеданс разрядных камер достигает 100 Ом и выше. Следует заметить, что хотя при $R_2 < 100$ Ом параметры генератора ухудшаются, их можно улучшить за счет включения между источником питания и разрядной камерой согласующего импульсного трансформатора.

При уменьшении сопротивления R_1 с 10 до 5 Ом, коэффициент η повышается с 75 до 86 % (более чем на 10 %).

Обычно обработка воды им-

Для проверки достоверности проведенного моделирования был выполнен физический эксперимент со следующими параметрами цепи: $C = 780$ пФ, $U_0 = 13,5$ кВ, $R_1 = 5$ Ом, $L = 12,5$ мкГн, $R_2 = 947$ Ом. В качестве ключа использовался газонаполненный разрядник РУ-62, как

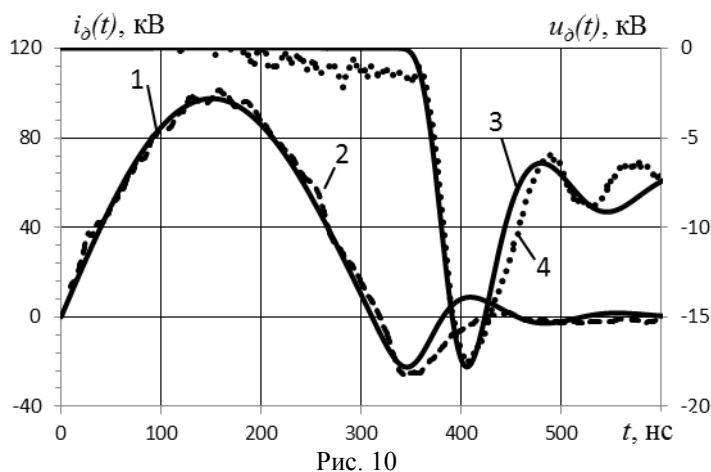


Рис. 10

VD – SOS-диоды SKR31F12, которые были включены последовательно в количестве 30 единиц. Для записи осциллограмм тока через диоды $i_d(t)$ и общего напряжения $u_d(t)$ на всех SOS-диодах использовались приборы фирмы Tektronix: цифровой двухканальный осциллограф TDS1012 с полосой пропускания 100 МГц, датчик тока P6021 и делитель напряжения P6015. Сравнение результатов эксперимента с моделированием, выполненным при тех же параметрах цепи, представлено на рис.

10. На нем рассчитанные (сплошные линии) и экспериментальные (пунктир) осциллограммы $i_d(t)$, изображены кривыми 1 и 2, а осциллограммы $u_d(t)$ – кривыми 3 и 4. Из рисунка видно, что амплитуды прямых токов через диод в обоих случаях совпадают и составляют около 105 А. Амплитуды обратных токов до прерывания тока также почти совпадают и составляют около 30 А. Из осциллограмм $u_d(t)$ следует, что фронты и амплитуды импульсов напряжений также почти совпадают. Различия между расчетными и экспериментальными кривыми наблюдаются в "хвостах" импульсов. Это можно объяснить неучтенными паразитными емкостями и индуктивностями в разрядной цепи, нелинейным сопротивлением разрядника, который для упрощения при моделировании заменялся активным сопротивлением, а также несовершенством компьютерной модели.

Выводы. Путем моделирования выполнено исследование влияния R, L, C -параметров с учетом начального напряжения емкостного накопителя энергии на выходные характеристики генератора высоковольтных коротких импульсов с индуктивным накопителем энергии, в котором в качестве коммутирующего элемента использовался SOS-диод. Показано, что для получения выходных импульсов напряжения в десятки киловольт с крутизной фронта около $2 \cdot 10^{11}$ В/с и длиной порядка 100 нс, приемлемыми для создания импульсного барьерного разряда, который может быть использован для эффективной обработки воды, величина индуктивности в разрядной цепи должна составлять $L = 5 \dots 10$ мкГн при $C = 700$ пФ. В этих условиях эффективность передачи энергии от первичного накопителя энергии (конденсатора) к нагрузке может достигать 70 %. Увеличить эффективность передачи энергии до 90 % можно благодаря увеличению величины L и уменьшению величины C . Но надо учитывать, что при этом уменьшаются выходное напряжение и энергия, передаваемая в нагрузку. Компенсировать такое снижение выходных параметров источника питания можно, если на это есть условия, за счет повышения напряжения заряда емкостного накопителя энергии. Величины активных сопротивлений коммутирующего ключа и индуктивности L надо минимизировать (до значений на уровне единиц ом и менее), поскольку их влияние на эффективность передачи энергии существенное (десятки процентов). При сопротивлениях нагрузки $1 \cdot 10^2 \dots 4 \cdot 10^3$ Ом эффективность передачи энергии наибольшая (80 %) и почти неизменна. При сопротивлениях менее 100 Ом она стремительно уменьшается. Поэтому обработку воды энергетически выгодно вести в разрядных камерах, импеданс которых превышает 100 Ом. Для мощных разрядных камер, импеданс которых меньше, целесообразно ввести к источнику питания согласующий импульсный трансформатор между ним и камерой. Достоверность моделирования подтверждена экспериментальными данными.

Результаты научных исследований по фундаментальным и прикладным темам, выполненным в отделе электромагнитных систем, использованы для создания новой электрофизической аппаратуры, внедренной в Институте электросварки им. Е.О. Патона и Институ-

те експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р.Е. Кавецького НАН України.

За отчетний період опубліковані 23 статті і тези доповідей на конференціях, а також отримані два патенти на винаходи.

1. *Блага О.В.* Електророзрядний метод вимірювання концентрації озону в повітрі // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія освіти): Мат. Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 14-26 жовтня 2013 р.) – К.: Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – 2013. – С. 55–57.
2. *Блага О.В., Божко І.В.* Дослідження генерації озону в імпульсному бар'єрному розряді // Техн. електродинаміка. – 2013. – №5. – С. 85–89.
3. *Божко І.В., Захарченко С.Н., Кондратенко І.П., Ращепкін А.П., Фальковський Н.И.* Электромагнитные системы в технологии непрерывного литья стали и электроразрядные системы для обеззараживания и очистки воды // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2013. – Вип. 35. – С. 67–81.
4. *Божко І.В., Кондратенко І.П., Жильцов А.В., Васюк В.В.* Методи визначення залишкових напружень // Пр. Таврійського держ. агротехнічного ун-ту. – 2013. – Вип. 13. Т.2. – С. 127–135.
5. *Божко І.В., Чарний Д.В.* Дослідження ефективності очистки води від органічних домішок імпульсними розрядами // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 81–86.
6. *Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко І.П., Ращепкін А.П.* Магнитное поле системы возбуждения на постоянных магнитах синхронного двигателя с полым ротором // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 58–63.
7. *Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко І.П., Ращепкін А.П.* Магнитное поле токов статорной обмотки синхронного двигателя с полым ротором // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 41–46.
8. *Жильцов А.В., Васюк В.В., Кондратенко І.П.* Використання електропластичного ефекту для зниження залишкових напружень // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Мат. Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 14-26 жовтня 2013 р.) – К.: Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – 2013. – С. 60–62.
9. *Жильцов А.В., Васюк В.В., Кондратенко І.П.* Тривимірний математичний модель процесу розрядження ємності на електромагнітну систему з послідовно з'єднаних котушки індуктивності, електрода і неферомагнітної пластини // Наук. вісн. НУБІП України. – 2013. – № 184. Ч. 1. – С. 94–104.
10. *Захарченко С.Н.* Повышение эффективности получения ультрадисперсных частиц металлов объемным электроэрозионным диспергированием их гранул в жидкости // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 16–23.
11. *Захарченко С.М.* Статистичні дослідження еквівалентного електричного опору гетерогенного струмопровідного середовища при його електроерозійній обробці на прикладі гранул алюмінію у воді // Наук. вісн. Нац. гірничого ун-ту. – 2013. – №1 (133). – С. 62–67.
12. *Кобильчак В.В.* Джерело живлення для формування імпульсного бар'єрного розряду в технології очистки води // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Мат. Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 14-26 жовтня 2013 р.) – К.: Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – 2013. – С. 57–59.
13. *Кондратенко І.П., Березюк А.О.* Розрахунок додаткових втрат потужності в багатопарових обмотках циліндричних індукторів // Наук. вісн. НУБІП України. – 2013. – №184. Ч. 2. – С. 208–213.
14. *Кондратенко І.П., Березюк А.О., Ращепкін А.П.* Электромагнитные и тепловые процессы в цилиндрическом индукторе для нагрева сыпучих сред // Вісн. Кременчуцького держ. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2013. – Вип. 2 (33). Ч. 2. – С. 63–67.
15. *Кондратенко І.П., Комарчук Д.С., Лисенко В.П.* Дослідження розподілу температури в навантаженні циліндричного індуктора // Наук. вісн. НУБІП України. – 2013. – № 184. Ч. 1. – С. 74–82.
16. *Кондратенко І.П., Комарчук Д.С., Лисенко В.П.* Обґрунтування еквівалентних геометричних параметрів для розрахунку циліндричних індукторів некругового перерізу // Наук. вісн. НУБІП України. – 2013. – №184. Ч. 2. – С. 128–135.
17. *Кондратенко І.П., Ращепкін А.П., Березюк А.О.* Розрахунок температурних полів в циліндричному індукторі для нагріву води // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Мат. Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 14-26 жовтня 2013 р.) – К.: Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – 2013. – С. 39–41.
18. *Кондратенко І.П., Ращепкін А.П., Ващишин Д.Д.* Динамічна модель пристрою для перетворення енергії морських хвиль на базі плоского лінійного генератора // Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування (теорія, практика, історія, освіта): Мат. Міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 14-26 жовтня 2013 р.) – К.: Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. – 2013. – С. 37–38.
19. *Кондратенко І.П., Ращепкін А.П., Ващишин Д.Д.* Енергетичні показники лінійного генератора для перетворення енергії морських хвиль // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – Вип. 2/2013 (22). Ч. 2. – С. 42–46.

20. Кондратенко И.П., Подольцев А.Д. Синтез оптимальной магнитной системы с постоянными магнитами для адресной доставки магнитных наночастиц в заданную область биологических сред // Техн. электро-динамика. – 2013. – № 4. – С. 3–12.
21. Пат. 102749 Україна. Спосіб вимірювання магнітної сприйнятливості магнітних рідин та пристрій для його реалізації / В.Ф. Чехун, О.В. Кириленко, В.В. Бондар, Н.Ю. Лук'янова, І.Н. Тодор, І.П. Кондратенко, І.М. Кучерява, О.Д. Подольцев. Опубл. 12.08.2013. Бюл. № 15.
22. Пат. 103356 Україна. Пристрій для створення високоградієнтного магнітного поля в лунках біологічного планшету / О.В. Кириленко, І.П. Кондратенко, О.Д. Подольцев, І.М. Кучерява, В.Ф. Чехун, В.В. Бондар, Н.Ю. Лук'янова, Д.В. Демаш, І.К. Хаєцький. Опубл. 10.10.2013. Бюл. №19.
23. Berezyuk F.O., Kondratenko I.P., Raschepkin A.P. Thermal field's calculation of cylindrical inductor loaded by a bundle of ferromagnetic rods // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture (Agricultural and Forest Engineering). – 2013. – № 62. – P. 85–92.
24. Lopatko K.G., Melnichuk M.G., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.V. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application // Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture. – 2013. – №61. – P. 105–115.
25. Ochin P., Gilchuk A., Monastyrsky G., Koval Yu., Shcherba A., Zaharchenko S. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids // Mat. Science Forum “European Symposium of Martensitic Transformations ESOMAT – 2012”. – 2013. – Vols. 738–739. – P. 451–456.

УДК 621.313: 621.355: 537.528: 621.3.014.14: 621.3.011.72: 621.373.54

І.В. Божко, канд. техн. наук, **С.М. Захарченко**, канд. техн. наук, **О.М. Карлов**, канд. техн. наук, **І.П. Кондратенко**, докт. техн. наук, **А.П. Ращепкін**, докт. техн. наук, **М.І. Фальковський**, канд. техн. наук
 Інститут електродинаміки НАН України,
 пр. Перемоги, 56, 03680, Київ-57, Україна
 E-mail: dep7ied@ukr.net

Основи теорії електромагнітних процесів у технологічних системах обробки матеріалів

Викладено методи аналізу та представлено основні наукові результати досліджень електромагнітних процесів у технологічних системах обробки матеріалів, отримані відділом електромагнітних систем у 2013 році. Бібл. 25, рис. 10.

Ключові слова: синхронний змішувач рідкого металу у кристалізаторі, імпульсний коронний розряд, електроерозійна обробка.

I.V. Bozhko, S.M. Zaharchenko, O.M. Karlov, I.P. Kondratenko, A.P. Raschepkin, N.I. Falkovsky

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
 Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine
 E-mail: dep7ied@ukr.net

Basic theory of electromagnetic processes in technological material handling systems

Methods of analysis and the main results of studies of electromagnetic processes in technological systems processing materials obtained in the department of electromagnetic systems in 2013 are set out. References 25, figures 10.

Key words: electromagnetic stirrer, pulse corona discharge, spark erosion processing.

Надійшла 21.03.2014

Received 21.03.2014