

УДК 621.313: 621.355: 537.528

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ**

И.В. Божко¹, канд. техн. наук, **И.П. Кондратенко**², докт. техн. наук, **А.П. Ращепкин**³, докт. техн. наук, **Н.И. Фальковский**⁴, канд. техн. наук

1–4 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Представлены основные научные результаты исследований отдела электромагнитных систем. Изложена суть исследований и приведены основные научные результаты, полученные в 2010 году. Библ. 7, рис. 7.

Ключевые слова: электромагнитный вибратор, электромагнитное перемешивание, непрерывное литье, электромагнитные силы, индукционный нагрев, переход коронного разряда в искровой.

Электромагнитные устройства для перемешивания жидкого металла в кристаллизаторах машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Применение в кристаллизаторах машин непрерывного литья заготовок трехобмоточных перемешивателей с дугостаторными обмотками для полного заполнения в них пазов требует использования однослойных трехплоскостных концентрических или шаблонных простых обмоток. Это значительно увеличивает размеры лобовых частей обмоток и уменьшает активную высоту перемешивателя. Существенно уменьшить размер лобовых частей и тем самым увеличить активную высоту перемешивателя позволяет применение обмоток с фазной зоной 120°. Поэтому представляется обоснованным оценить энергетические показатели электромагнитных перемешивателей, выполненных с использованием таких обмоток. В работе [4] разработан метод расчета электромагнитных полей и усилий в жидком металле кристаллизатора под воздействием электромагнитного поля трехобмоточного перемешивателя с обмоткой с фазной зоной 120°. Установлены функциональные зависимости для определения энергетических показателей перемешивателя и силового действия на жидкий металл без использования обратных интегральных преобразований. Показано, что потребляемая электромагнитным перемешивателем мощность намного превышает электромагнитную. Однако исполнение обмотки с фазной зоной 120° позволяет достичь необходимых по технологическим требованиям параметров перемешивания при уменьшении осевого габарита устройства, что имеет существенное значение для проектирования новых и модернизации действующих МНЛЗ.

Электромагнитный вибратор для МНЛЗ. Принцип работы машин непрерывного литья заготовок предусматривает качание кристаллизатора с частотой 3...6 Гц и амплитудой 2...8 мм. Общая тенденция развития техники качания кристаллизатора заключается в использовании упругого подвеса и гидравлического привода. Гидравлический привод для сортовой МНЛЗ включает гидравлическую станцию с насосом, развивающим давление до 20 МПа, трубопроводы повышенного давления с системой управления, клапанами, аккумулирующую емкость примерно на 1 т с системой фильтрации и подогрева масла. Дополнительно имеется большое количество контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающей управляемость и контролируемость процесса качания. Все это имеет повышенный уровень пожароопасности и требует соответствующих эксплуатационных расходов. Увеличение скорости разлива стали сопряжено с увеличением частоты колебаний кристаллизатора и уменьшением амплитуды. Последнее в случае гидропривода становится трудноосуществимым. Поэтому увеличение скорости разлива стали, что равнозначно увеличению производительности установленного оборудования, связывают, помимо других проблем, с созданием

управляемого электромеханического провода, обеспечивающего точность установки, исключая проблемы передачи движения через сопрягающиеся механические узлы и облегчающего эксплуатацию. Однако электромагнитное устройство более громоздко, чем гидравлическое. В связи с тем, что действующие МНЛЗ были спроектированы под установку гидропривода, возникает задача достижения удельных характеристик электромагнитных вибраторов, сравнимых с гидроприводом.

Принятое конструктивное исполнение электромагнитного вибратора на базе однофазной линейной цилиндрической машины с постоянными магнитами [1, 2] удовлетворяет исходным требованиям по габаритным размерам и максимальной амплитуде колебания якоря. Очевидно, что электромагнитный привод для качания кристаллизатора должен обладать повышенной надежностью и достаточной перегрузочной способностью. Поэтому в отличие от известных конструкций электромагнитных вибраторов, например, для прокладки подземных коммуникаций, предложенное исполнение в связи с малой амплитудой колебаний предусматривает размещение обмотки и магнитов в пазах статора и межполюсных пазах якоря соответственно.

Моделирование электромагнитных процессов выполнено с применением метода конечных элементов, на основе которого для заданного конструктивного исполнения установлены зависимости потокосцепления обмотки статора в зависимости от величины тока и пространственного положения якоря:

$$\Psi(x, i) = 0,0983 + 244,44x + 126,4x^2 + 1,742 \cdot 10^{-2}i - 2,87 \cdot 10^{-6}i^2 + 2,05 \cdot 10^{-2}xi - 5,52ix^2 - 6,63 \cdot 10^{-4}xi^2.$$

С использованием максвелловского тензора магнитных натяжений определена осевая x -составляющая электромагнитной силы взаимодействия якоря и статора в виде поверхностного интеграла по любой цилиндрической поверхности S , расположенной в зазоре между ротором и статором вибратора. Функциональная зависимость электромагнитной силы взаимодействия якоря и статора вибратора приближенно представлена полиномом двух переменных – величины тока и пространственного положения:

$$f_e(x, i) = 322 - 8,51 \cdot 10^4 x + 7,66 \cdot 10^6 x^2 + 8,356 \cdot 10^8 x^3 + 250i + 5,08 \cdot 10^{-3}i^2 + 200xi - 56,25xi^2 - 4,35 \cdot 10^5 x^2i - 17,8x^2i^2 - 1,1 \cdot 10^6 x^3i + 1,15 \cdot 10^5 x^3i^2.$$

Динамическое состояние электромеханической системы вибратора при питании обмотки статора напряжением $u(t)$ описывается уравнением Кирхгофа для электрической цепи и уравнением равновесия для электромеханической системы, полученном на основе принципа Даламбера. Механическая сила $f_e(x, i)$ учитывается в уравнении движения как дополнительно приложенная сила

$$u(t) = Ri + \frac{d\Psi(i, x)}{dt} = Ri + \frac{\partial\Psi(i, x)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial\Psi(i, x)}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial t};$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha \frac{dx}{dt} - K(h - x) = f(t) + f_e(x, i).$$

При питании обмотки статора от преобразователя частоты синусоидальным напряжением $u(t) = U \sin(2\pi ft)$ устанавливается колебательное движение якоря вибратора с заданными частотой f и амплитудой колебаний, которые достигаются при определенной величине напряжения U .

На основе численного решения системы уравнений динамического состояния для принятых значений коэффициентов вязкого трения и жесткости пружин подобрано такое значение $U = 60 \text{ В}$, при котором достигаются требуемая частота $f = 4,16 \text{ Гц}$ и амплитуда колебаний $x(t) = 0,005 \text{ м}$. На рис. 1 а, б приведены соответственно установившиеся законы колебаний якоря и величины тока в обмотке статора на промежутке времени – 1 с.

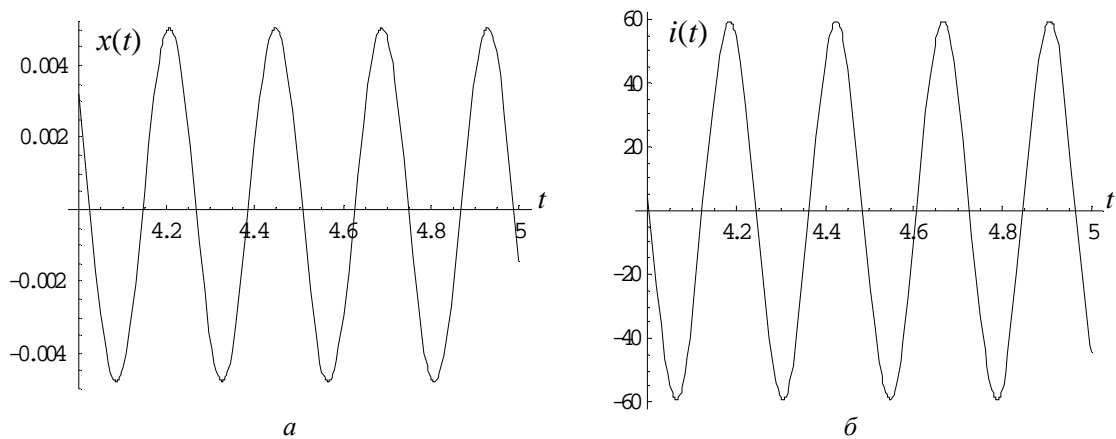


Рис. 1

При питании обмотки вибратора импульсным напряжением в виде меандра $u = U \sin(2\pi ft) / |\sin(2\pi ft)|$, что существенно упрощает исполнение преобразователя частоты, для обеспечения требуемой амплитуды колебания вибратора, например, 0,005 м, при частоте основной гармоники 4,16 Гц, величина импульсного напряжения, рассчитанная согласно разработанной методике, должна составить 48 В, а потребляемая мощность окажется равной 969 Вт.

Следует отметить, что для всех возможных технологических режимов работы вибратора, характеризуемых величинами амплитуды и частоты колебания, соблюдается приближительное равенство потребляемых мощностей, действующих и средних значений тока при питании вибратора синусоидальным или импульсным напряжением соответствующей величины, при котором поддерживается равенство амплитуды колебания. Вместе с тем законы изменения мгновенных значений положения якоря вибратора (рис. 2 а) и тока обмотки (рис. 2 б) существенно отличаются от предыдущих.

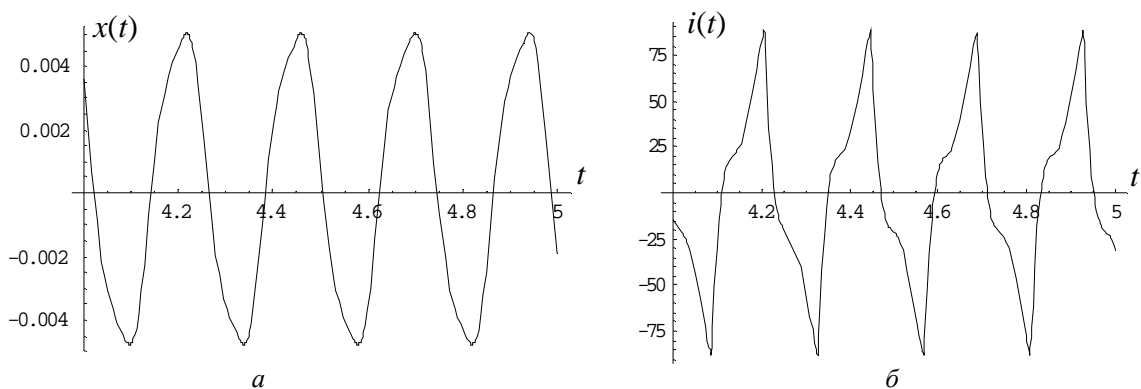


Рис. 2

Из приведенных иллюстраций видно, что при питании обмоток напряжением прямоугольной формы закон движения якоря отличается от синусоидального (рис. 2 а), что обусловливается соответствующим законом изменения тока якоря (рис. 2 б). Для движения якоря становятся характерными скачкообразные изменения скорости движения. Очевидно, что такой характер движения гильзы кристаллизатора может существенно сказаться на соблюдении технологии непрерывного литья. Так, на стенке кристаллизатора, который, по сути, является теплообменным аппаратом, в результате скачкообразного движения условия теплообмена будут неоднородными. А это явление может привести к прорывам жидкого металла и аварии.

В результате проведенного анализа установлено, что синусоидальный закон движения вибратора под нагрузкой достигается при питании обмотки вибратора синусоидальным напряжением. Амплитуда колебания электромагнитного вибратора незначительно подвержена случайным изменениям коэффициента вязкого трения слитка о стенки кристаллизатора. Для всего возможного диапазона изменения коэффициента вязкого трения изменение амплитуды колебания не превышает $\pm 9\%$. В диапазоне возможного изменения частоты колебаний кристаллизатора электромагнитный вибратор не подвержен резонансным явлениям электромеханической системы.

С учетом низкой частоты электропитания электромагнитного вибратора актуальным может быть упрощение конструкции за счет выполнения ферромагнитных элементов в виде массивных магнитопроводов. В работе [3] разработана математическая модель связанных нестационарных электромагнитных и механических процессов в линейном приводе с массивными магнитопроводами. Разработан алгоритм численной реализации модели. Решение электромагнитной задачи сведено к системе интегро-дифференциальных уравнений для плотности вихревых токов в сечении массивных проводников и токов намагниченности на границах магнитопроводов с учетом движения якоря, дополненной уравнениями, записанными по второму закону Кирхгофа для цепи якоря и статора. Решение задачи о движении якоря в поле электромагнитных сил сведено к интегродифференциальному уравнению, записанному на основании второго закона Ньютона.

Линейные генераторы для преобразования энергии волн. В работе [6] продемонстрирована возможность использования линейных машин с постоянными магнитами для

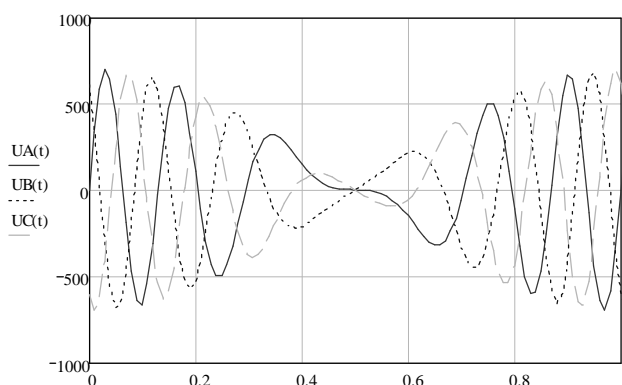


Рис. 3

преобразования энергии волн. Рассмотрен плоский трехфазный линейный генератор, в котором индуктор приводится в движение за счет силы Архимеда.

Разработан метод определения электродвижущей силы линейного генератора неявнополюсного исполнения и установлена функциональная зависимость электродвижущей силы двустороннего линейного генератора с постоянными магнитами неявнополюсного исполнения. Установлено, что ЭДС генератора изменяется во времени по амплитуде и частоте (рис. 3)

Электрические и энергетические характеристики цилиндрических индукторов с нагрузкой в виде пучка ферромагнитных труб. Среди устройств индукционного нагрева значительное место занимают цилиндрические индукторы, охватывающие нагреваемое изделие. Методы расчета таких индукторов достаточно хорошо развиты и включают большинство известных методов – от магнитных схем замещения до современных численных на основе полевого подхода. В работе [5] представлен аналитический метод расчета цилиндрических индукторов, в котором расчет магнитного поля осуществляется с учетом конечной длины индуктора и нелинейных свойств ферромагнитной стали. Учет нелинейности магнитной проницаемости выполнен в соответствии с моделью Л.Р. Неймана – изначально допускается постоянство магнитной проницаемости, рассчитывается напряженность магнитного поля на поверхности загрузки и определяется новое приближение для итерационного процесса. На основе разработанной методики расчета электрических параметров и энергетических характеристик индуктора при нагреве осесимметрично расположенной трубы предложен простой метод расчета вносимого комплексного сопротивления последовательной схемы замещения индукционной установки в случае, когда загрузка индуктора представляет собой разреженный пучок ферромагнитных труб: $z_m = n \cdot z_{m1} - z_{xx} \cdot (n - 1)$, где z_{m1} – вносимое комплексное сопротивление индуктора

при загрузке его одной трубой малого диаметра; n – число труб; z_{xx} – вносимое комплексное сопротивление пустого индуктора.

Предложенный метод расчета энергетических характеристик индуктора многократно опробовался при проектировании индукционных устройств различного назначения и показал результаты достаточной для практики достоверности.

Исследование импульсного коронного разряда на поверхность воды и перехода его в искру. Как следует из литературных данных, попытки использовать коронный разряд (КР) для обработки воды не ослабевают. Существует мнение, что ожидается высокая эффективность от использования для этих целей импульсного коронного разряда (ИКР). Однако для практической реализации такого способа обработки недостаточно известных знаний об ИКР. В особенности это относится к коронным разрядам непосредственно на поверхность обрабатываемой воды, от которых ожидается наибольшая эффективность. При этом, в частности, для повышения энергетической эффективности процесса желательно максимальное снижение уровня рабочего напряжения, что требует уменьшения длины рабочего разрядного промежутка. Снижение длины разрядного промежутка КР в свою очередь приводит к нежелательному облегчению условий для перехода КР в режим искрового пробоя разрядного промежутка. Переход коронного разряда в искровой при ИКР на поверхность воды практически не изучен, хотя послекоронная (искровая) стадия разряда на поверхность воды изучалась.

Целью работы [7] явилось исследование влияния слоя воды, покрывающего некоронирующий электрод, на параметры импульсного коронного разряда и его переход в искровой разряд.

Экспериментальная установка для исследований состояла из разрядной ячейки, источника высокого импульсного напряжения, средств диагностики и других элементов. Верхним электродом разрядного промежутка служил диск диаметром 60 мм, на котором размещено 230 коронирующих игл диаметром 0,2 мм.

Расстояние между иглами и их высота равны 4 мм. Нижний электрод диаметром 80 мм размещен на дне чашки Петри и покрыт слоем жидкости. Электроды и иглы сделаны из нержавеющей стали. В качестве жидкости использовалась вода с различной удельной электропроводностью σ , См/см: дистиллированная ($2 \cdot 10^{-6}$ См/см), водопроводная ($5,5 \cdot 10^{-5}$ См/см) и водный раствор $NaCl$ ($6,7 \cdot 10^{-2}$ См/см).

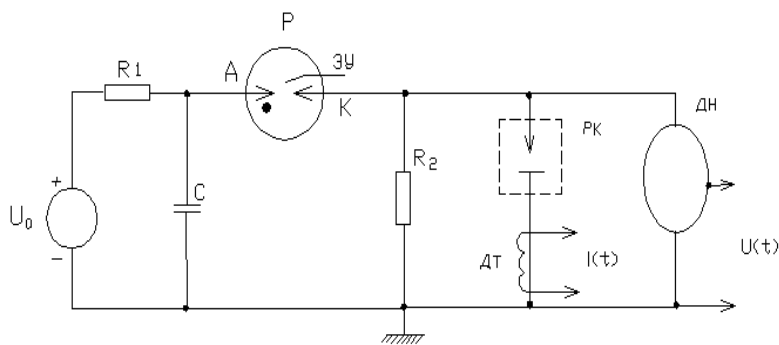


Рис. 4

Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 4. При исследованиях использовался импульсный источник высокого напряжения, построенный на основе заряда конденсатора C через сопротивление R_1 от источника постоянного напряжения U_0 с последующим разрядом этого конденсатора на сопротивление R_2 и разрядную ячейку

PK . В качестве быстродействующего коммутирующего элемента использовался газонаполненный управляемый разрядник P . Для записи осциллограмм тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ использовались приборы фирмы Tektronix: двухканальный осциллограф TDS 1012 с индуктивным датчиком тока P6021 и датчиком напряжения P6015A. Электрическая схема обеспечивала импульсы напряжения с амплитудой до 25 кВ и длительностью до 300 нс. Энергия импульса W_u определялась численным интегрированием

$$W_u = \int_0^{\tau_u} u(t) \cdot i_k(t) \cdot dt, \quad (1)$$

где $i_k(t) = i(t) - i_3(t)$ – ток коронного разряда, $i_3(t)$ – емкостный ток через разрядный промежуток, который определяется по выражению

$$i_3(t) = C_3 \cdot du(t)/dt, \quad (2)$$

где C_3 – емкость электродной системы.

Результаты экспериментов. Типичные осциллограммы ИКР показаны на рис. 5. На них кривыми 1 отобраны осциллограммы тока $i(t)$ с масштабом 50 А/дел (рис. 5 а, б, в, г) и 20 А/дел (рис. 5 д, е), кривыми 2 – осциллограммы напряжения $u(t)$ с масштабом 5 кВ/дел по оси ординат. Масштаб по оси абсцисс для всех осциллограмм – 50 нс/дел. S – толщина слоя воды, l – длина разрядного (воздушного) промежутка. Условия разряда: водопроводная вода (а, б, в, г), раствор $NaCl$ (д, е); игольчатый электрод – анод (а, в, г, д, е) или катод (б); $S = 0$ мм, $l = 10$ мм (а, б); $S = 3$ мм, $l = 7$ мм (в); $S = 1,5$ мм, $l = 2$ мм (г); $S = 12$ мм, $l = 3$ мм (д, е). Энергия конденсатора C на момент коммутации разрядника $W_C = CU^2/2 = 0,14$ Дж. Переход ИКР в ИР фиксировался визуально и отобразился на осциллограммах $i(t)$.

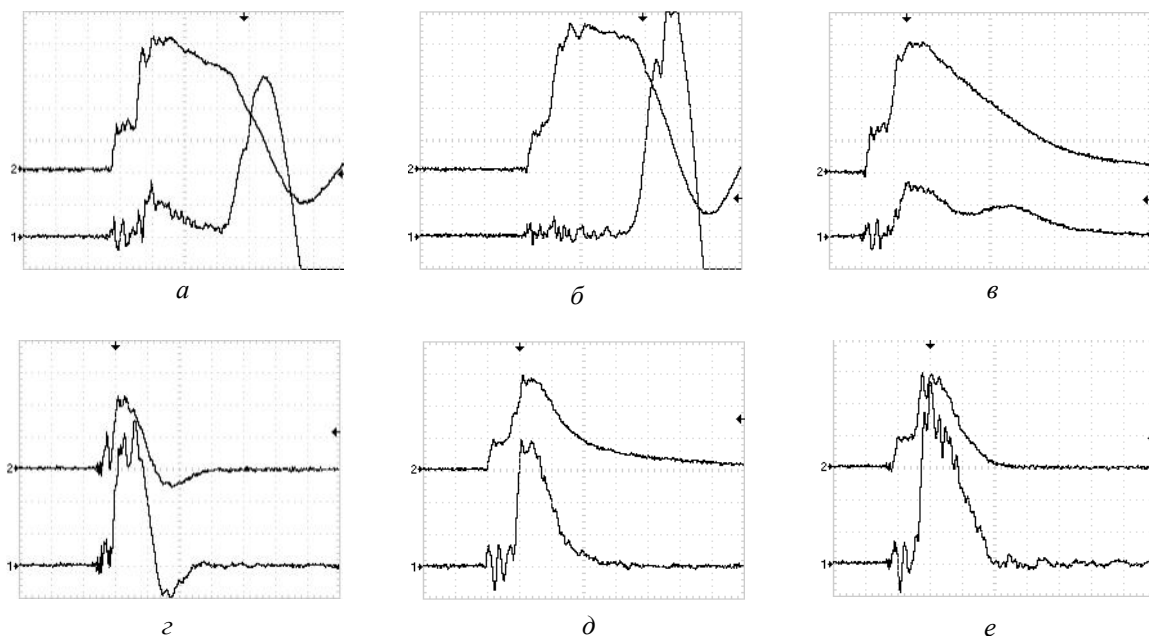


Рис. 5

Характерной особенностью импульсного коронирования многоигольчатого электрода является наличие двух разных процессов в течение одного импульса напряжения, отражающихся на кривой импульса тока двумя амплитудами, сильно различающимися по характеру и величине (рис. 5). Первый – собственно импульсный коронный разряд (ИКР), рис. 5 а. На указанной осциллограмме этот импульс имеет амплитуду $I_{m1} \approx 80$ А. Второй процесс – искровой разряд (ИР), являющийся пробоем разрядного промежутка. Ему соответствует хорошо выраженный второй импульс тока со значительно большей амплитудой $I_{m2} \approx 250$ А. Визуально ИР представляет собой яркую тонкую нить белого цвета, соединяющую одну из иголок и противоположный электрод. Как видно на осциллограмме рис. 5 а, с момента начала импульсов тока и напряжения КР до начала ИР проходит время $t_{up} \approx 180$ нс. Время t_{up} условно можно считать временем формирования ИР. Для условий, соответствующих рис. 5 а, ИР начинается еще до окончания импульса тока ИКР на спадающем участке $u(t)$ при напряжении $u_{up} = 16$ кВ.

Влияние полярности импульса напряжения проявляется в том, что при одних и тех же условиях отрицательный ИКР (рис. 5 б) сопровождается меньшим током КР ($I_{m1} \approx 20$ А) и временем до ИР ($t_{up} \approx 150$ нс), однако большими значениями величин, характеризующих ИР:

$I_{m2} = 350$ А, $u_{up} = 22$ кВ. Относительно большие величины I_{m2} и малые t_{up} , вероятно, связаны с тем, что переход отрицательного ИКР в ИР происходит при больших напряжениях u_{up} , чем в случае положительного ИКР.

Наличие воды на плоском электроде с толщиной слоя $S = 3$ мм практически не влияет на величину тока положительного ИКР, рис. 5 в. Так же, как и при $S = 0$ (рис. 5 а), амплитуда тока ИКР $I_{m1} = 80$ А. Однако присутствие воды в пять раз уменьшает ток ИР I_{m2} (с 250 до 50 А).

Длина промежутка существенно влияет на параметры ИКР. При уменьшении длины воздушного промежутка l амплитуда тока ИКР нарастает. Так, при изменении l от 12 до 2 мм ток I_{m1} увеличивается от 15...40 до 300 А ($S = 3$ мм, водопроводная вода, отрицательный ИКР). При $l \leq 6$ мм в рассматриваемых условиях одноканальный ИР отсутствует, а пробой разрядного промежутка реализуется как непосредственный переход ИКР по уровню тока в импульсный разряд. Это видно на осциллограмме рис. 5 з ($l = 2$ мм), где ток ИКР I_{m1} равен току пробоя ИР $I_{m2} = 250$ А при $l = 10$ мм, рис. 5 а.

Комплексное влияние l , S и σ на ток ИКР I_{m1} хорошо видно на рис. 6, на котором для положительного ИКР представлены зависимости тока I_{m1} от величины воздушного промежутка l при $S = 0$ (кривая 1), $S = 1,5$ мм (кривые 2, 4) и $S = 5$ мм (кривые 3, 5) при водопроводной (кривые 2, 3) и дистиллированной (кривые 4, 5) воде.

Сравнение токов I_{m1} , полученных при одинаковых значениях S или σ , показывает как эти параметры влияют на возрастание тока ИКР с уменьшением величины l . Поскольку влияние S и σ на I_{m1} усиливается с уменьшением воздушного промежутка, то можно заключить, что при малых l величина тока I_{m1} определяется толщиной слоя жидкости, а при больших l – длиной газового промежутка. При замене водопроводной воды на водный раствор $NaCl$ (увеличение σ на три порядка) эти закономерности изменения тока $I_{m1}(l, S \text{ и } \sigma)$ сохраняются. Однако при этом появляются особенности при переходе ИКР в ИР. На рис. 5 д

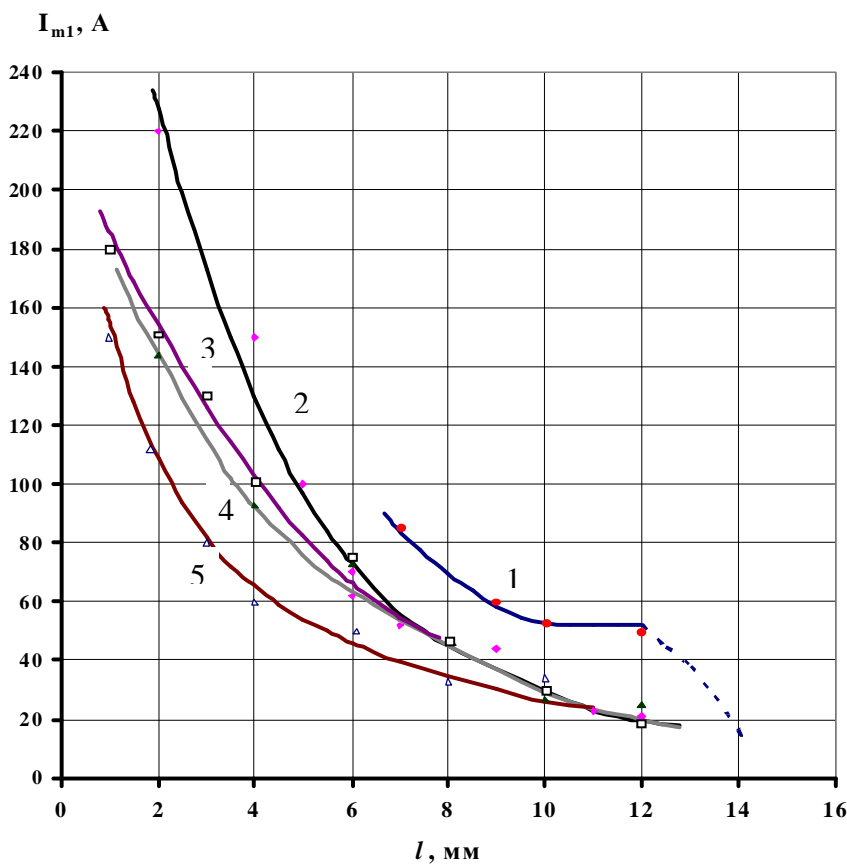


Рис. 6

и е представлены осциллограммы разряда на поверхность водного раствора $NaCl$ ($S = 12$ мм, $l = 3$ мм) для двух случаев: без перехода (рис. 5 д) и с переходом (рис. 5 е) ИКР в ИР. Значение $l \approx 3$ мм является граничной величиной, выше которой ИР не происходит. Осциллограммы рис. 5 д имеют обычный для ИКР вид: ток $I_{m1} = 80$ А и после окончания импульса тока на промежутке еще остается напряжение около 4 кВ. В случае перехода ИКР в ИР, который наблюдался визуально, амплитуда импульса тока достигает 110 А (рис. 5 е), а напряжение по окончании импульса тока падает до нуля. Еще до окончания импульса тока ИКР начинается

импульс тока ИР. На основании осциллограммы тока $i(t)$ можно оценить время формирования ИР t_{up} , которое составляет около 70 нс.

Обсуждение результатов. Выполненные экспериментальные исследования показали большое влияние слоя воды в разрядном промежутке на параметры ИКР и его переход в ИР. Установлено также, что роль этого слоя усиливается с уменьшением длины воздушной части промежутка l . Наличие слоя воды на электроде можно рассматривать как фактор, увеличивающий импеданс разрядного промежутка Z . Характер зависимости этой величины от расстояния между концами иглол и поверхностью водопроводной воды l представлен кривой 2 на рис. 7 а (иглы – анод, $S = 5$ мм). Значения Z рассчитывались по выражению $Z = U_m/I_m$, где U_m – напряжение на электродах в момент, когда разрядный ток достигал максимума I_m . Отрицательные значения l соответствуют условиям, при которых концы игл были погружены в воду. За величину I_m при $l \geq 0$ принимался ток ИКР I_{m1} .

Зависимость тока I_m от величины l отображена кривой 1 на рис. 7 а. Из нее видно, что с уменьшением l этот ток линейно нарастает. Однако в диапазоне $l = 2 \dots 0$ мм темп нарастания снижается. Это подтверждает отмеченную выше закономерность: при малых промежутках l определяющее влияние на величину разрядного тока приобретает слой жидкости. При погружении иглол в воду ($l \leq 0$) характер изменения тока I_m вновь становится линейным с возросшим углом наклона зависимости $I_m(l)$.

Измерения активного сопротивления R растеканию тока с иглол, погруженных в воду (рис. 7 а, кривая 3), показывает, что величина R в несколько раз выше значений Z . Из этого следует, что разрядный ток при прохождении через воду имеет не только активную, но и емкостную составляющую, причем емкостная составляющая превалирует.

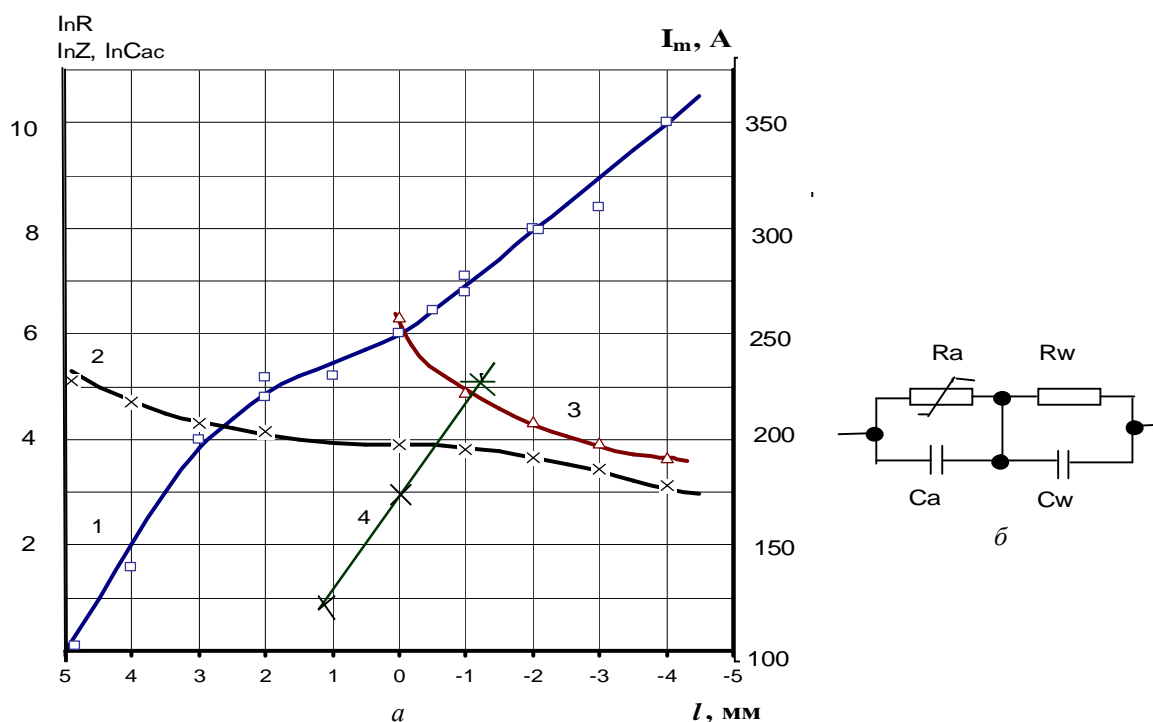


Рис. 7

На основании полученных результатов можно предложить эквивалентную схему замещения разрядного промежутка (рис. 7 б), позволяющую объяснять закономерности протекания через него разрядного тока $i(t)$. На этой схеме R_a , R_w , C_a , C_w – соответственно активные сопротивления и емкости воздушной и водной части межэлектродного промежутка. Сопротивление R_a – нелинейное, т. к. зависит от напряжения на электродах. Значение этой величины можно оценить исходя из осциллограмм тока и напряжения ИКР, полученных при

отсутствии воды: $R_a = U_{ml} / I_{ml}$, где U_{ml} – напряжение на разрядном промежутке в момент максимума тока I_{ml} . Расчёты показывают, что величина R_a с уменьшением l от 12 до 6 мм линейно снижается с 360 до 180 Ом. При дальнейшем уменьшении l ИКР сразу переходит в ИР и на основании осциллограмм трудно определять значения R_a . Однако можно отметить, что линейная аппроксимация зависимости $Z(l)$ в области $l < 6$ мм показывает при $l = 0$ вполне закономерное значение $Z = 0$.

Измерения емкости разрядного промежутка при отсутствии слоя воды ($S = 0$) показали, что $C_a \approx 2$ пФ. Эта величина определяет ток $i(t)$ на начальном этапе разряда, когда ИКР только начинает формироваться ($R_a \rightarrow \infty$). Оценить величину этого тока можно по выражению (2). Принимая $C_a = 2$ пФ, при скорости изменения напряжения на электродах в начальный момент времени $du/dt \approx 10^{12}$ В/с (получена из осциллограмм напряжения) получаем $i_C \approx 2$ А. Длительность импульса этого тока t_C определяется постоянной времени зарядной цепи $\tau_C = R_3 \cdot C_a$, где R_3 – сопротивление зарядной цепи, зависящее в основном от сопротивления коммутирующего разрядника, которое в свою очередь зависит от величины протекающего через него тока. Исходя из осциллограмм тока, полученных при напряжениях ниже напряжения начала ионизации в разрядном промежутке, можно считать, что $t_C \approx 3 \cdot \tau_C \approx 10$ нс. Поэтому на более позднем этапе формирования ИКР ($t \geq 10$ нс) вкладом емкостного тока через C_a в общий ток разряда можно пренебречь.

Измерения емкости межэлектродного промежутка $C_{ак}$ в зависимости от расстояния между концами игл и поверхностью слоя водопроводной воды ($S = 5$ мм) показали, что при $l \geq 1$ мм $C_{ак} \approx 2$ пФ. При приближении концов игл на расстояние менее 1 мм и дальнейшем их погружении в жидкость значение $C_{ак}$ экспоненциально увеличивается. В момент контакта игловок с водой ($l = 0$) величина $C_{ак}$ достигает 20 пФ. Эти изменения $C_{ак}$ отображены кривой 7 на рис. 7а. Такой ход зависимости $C_{ак}(l)$ позволяет прийти к выводу: когда головка стримера приближается к поверхности воды, определяющее влияние на протекание разрядного тока через жидкость приобретает емкость C_w . Именно благодаря емкостной составляющей разрядного тока через воду импеданс межэлектродного промежутка Z (кривая 2 на рис. 7а) оказывается в несколько раз ниже сопротивления слоя воды R_w (кривая 3). По мере окончания поляризационных процессов в воде (то есть по мере заряда емкости C_w) доля емкостного тока через жидкость в общем разрядном токе уменьшается, а активного – увеличивается. Длительность протекания емкостного тока через воду t_{CW} определяется постоянной времени τ_{CW} зарядки емкости C_w :

$$t_{CW} \approx 3 \cdot \tau_{CW} = 3 \cdot R_S \cdot C_w. \quad (3)$$

В этом выражении R_S – сопротивление зарядной цепи, включающей сопротивления разрядника и стримерных каналов, которые сложным образом зависят от многих параметров разряда, а также от времени. Расчет этой величины представляется сложной задачей. Если считать, что $C_w \approx 20$ пФ (измеренное значение емкости электродной системы в момент касания иглками воды), а $R_S \approx 400$ Ом (среднее значение импеданса разрядной цепи за время фронта импульса ИКР на поверхность электрода без воды), то имеем $t_{CW} \approx 24$ нс.

Таким образом, можно утверждать, что на начальном этапе ИКР в разрядном токе через слой воды в течение ~ 20 нс преобладает емкостная составляющая, благодаря которой на это время существенно уменьшается импеданс разрядной цепи.

На более позднем этапе ИКР ($t > 20$ нс) разрядный ток определяется сопротивлением слоя воды R_w , который играет роль балластного сопротивления. Благодаря этому сопротив-

лению увеличивается время t_u перехода ИКР в ИР. Если это время слишком велико и после импульса тока ИКР напряжение на электродах успевает существенно снизиться, то ИР не возникает.

Выводы. При импульсном коронном разряде на поверхность воды слой ее играет роль резистивно-емкостного балластного сопротивления. На начальном этапе импульса тока (~ 20 нс) импеданс этого сопротивления может быть в несколько раз ниже омического сопротивления слоя воды. За счет большой емкостной составляющей тока через воду влияние слоя воды на ограничение разрядного тока в газе невелико. На завершающем временном этапе импульса тока коронного разряда определяющее влияние на величину тока приобретает омическое сопротивление слоя воды, которое зависит от толщины слоя и удельного сопротивления воды. Это сопротивление способствует снижению амплитуды импульса тока коронного разряда и увеличению времени формирования искрового разряда. Подбирая параметры разрядной цепи, можно достичь режима при котором даже при малых длинах воздушного промежутка (~ 1 мм) импульсный коронный разряд не будет переходить в искру. Обработка воды импульсным коронным разрядом в таком режиме позволит получать при умеренных напряжениях источника питания высокие электрические поля в головках стримеров, достигающих поверхности жидкости.

1. Виштак Т.В., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Динамические режимы электромагнитного вибратора // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 3.
2. Виштак Т.В., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Электрические параметры и силы электромагнитного вибратора для машины непрерывного литья заготовок // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 57–63.
3. Жильцов А.В., Сорокин Д.С., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Математическое моделирование электромеханических процессов в линейно-коаксиальном двигателе // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. "Моделювання-2010". – К., 2010. – С. 47–54.
4. Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Магнитное поле и электродинамические силы трехобмоточного электромагнитного перемешивателя // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 4. – С. 55–63.
5. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Березюк А.О. Энергетические характеристики и электрические параметры индукторів для нагріву пучка ферромагнітних труб // Вісн. Кременчуцького ДПУ. – 2010. – Вип. 3(62), Ч. 2. – С. 56–60.
6. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Ваццишин Д.Д. Розрахунок електрорушійної сили лінійного генератора для перетворення енергії хвиль // Вісн. Кременчуцького ДПУ. – 2010. – Вип. 4(63), Ч. 1. – С. 72–75.
7. Bozhko Igor V., Kondratenko Igor P., Serdyuk Yuriy V. Corona Discharge to Water Surface and Its Transition to a Spark // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – № 5.

УДК 621.313: 621.355: 537.528

І.В. Божко¹, канд. техн. наук, **І.П. Кондратенко²**, докт. техн. наук, **А.П. Ращепкін³**, докт. техн. наук, **М.І. Фальковський⁴**, канд. техн. наук

1–4 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, 03680, Київ-57, Україна

Електромагнітні і електророзрядні технологічні установки

Висвітлено основні наукові результати досліджень відділу електромагнітних систем. Викладено сутність досліджень та наведено основні наукові результати, що отримані в 2010 році. Бібл. 7, рис. 7.

Ключові слова: електромагнітний вібратор, електромагнітне перемішування, безперервне лиття, електромагнітні сили, індукційне нагрівання, перехід коронного розряду в іскровий.

I.V. Bozhko¹, I.P. Kondratenko², A.P. Rashepkin³, M.I. Falkovskiy⁴

1–4 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Electromagnetic and Electric Discharge Processing Systems

The main scientific results of Electromagnetic System Department researches are presented. The essence of studies is expounded and fundamental results of the researches obtained in the 2010 year are submitted. References 7, figures 7.

Key words: the electromagnetic oscillator, electromagnetic stirring, continuous casting, electromagnetic force, induction heating, corona-spark transition.

Надійшла 06.03.2011

Received 06.03.2011