

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПАКТНЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

А.А. Щерба¹, чл.-корр. НАН Украины, А.В. Иванов², мл. науч. сотр.

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

2 – Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-а, Николаев, 54018, Украина

Разработаны принципы построения высоковольтных компактных электротехнических систем обработки кристаллизующихся расплавов металлов электроразрядными импульсами. Приведена структурная схема таких систем для генерирования больших импульсных мощностей и формирования в локальных объемах расплавов высоких плотностей энергии с взаимным наложением первичных и вторичных электрофизических воздействий. Определены оптимальные диапазоны изменения энергетических и динамических параметров высоковольтных генераторов разрядных импульсов, а также пути уменьшения массогабаритных показателей генераторов и реализации компактных разрядно-импульсных систем электрогидравлической обработки жидких металлов. Библ. 12, рис. 4, табл. 2.

Ключевые слова: компактная электроразрядная система, импульс, ток, мощность, расплав, металл, силовое воздействие, наложение.

Повышение удельных энергетических и электродинамических характеристик современных разрядно-импульсных систем является одной из основных электротехнических задач, от решения которых зависит конкурентоспособность разрабатываемых технологий электроимпульсной обработки различных сред [1–3, 8–12]. В работах [1–4, 8–12] показана перспектива применения высоковольтных разрядно-импульсных систем для электрогидравлической обработки кристаллизующихся металлических расплавов с целью повышения качества и эксплуатационных свойств изготавливаемых из них металлических изделий.

Известно, что для реализации электрогидравлического эффекта в водном межэлектродном промежутке генератор импульсных токов (ГИТ) должен создавать очень большие импульсные мощности и локальные плотности выделяемой электрической энергии [4]. Для увеличения импульсной мощности и плотности энергии, выделяемых в искроплазменном канале межэлектродного промежутка, в большинстве ГИТ увеличивают напряжение заряда накопительных конденсаторов до 50 кВ [1, 2]. При разрядно-импульсной обработке металлического расплава получение в нем такой же высокой локальной плотности энергии, как и в водной среде, затруднено из-за многократного увеличения удельных коэффициентов электро- и теплопроводности. Повышение напряжения заряда накопительных конденсаторов более 50 кВ в настоящее время ограничено техническими и экономическими причинами. В то же время в работе [9] обосновано, что дополнительное повышение импульсных силовых воздействий на локальные объемы жидких сред возможно без увеличения импульсной мощности ГИТ и электрической энергии в их накопительных конденсаторах.

Одним из таких подходов является уменьшение габаритных размеров генератора разрядных импульсов и в первую очередь блоков и элементов его разрядного контура, включая межэлектродный промежуток. Это позволяет уменьшать индуктивность разрядного контура, увеличивая скорость нарастания тока, и уменьшать длительность разрядных импульсов, увеличивая таким образом импульсную мощность, выделяемую в межэлектродном промежутке.

Вторым очень важным подходом является уменьшение граничных размеров обрабатываемых сред до значений, при которых отраженные от границ силовые возмущения (в первую очередь электрогидравлические колебания) приходят как вторичные процессы в локальные объемы жидкости, в которых еще действуют первичные процессы. В результате наложения первичных и вторичных силовых воздействий в жидкости могут возникать интерферен-

ционные явления, вызывающие усиление силовых возмущений ее локальных микрообъемов. Возможно также влияние вторичных электрофизических процессов на первичные искроплазменные, электрогидравлические, термо- и газодинамические импульсные явления.

Под вторичными электрофизическими процессами подразумевают электродинамическое взаимодействие токов близко расположенных плазменных каналов разветвленных электроискровых нестационарных высокотемпературных тепловых потоков, электронно- и термоэмиссионные процессы, а также кавитационные гидрогазодинамические возмущения, характерные для разрядно-импульсных искроплазменных процессов в жидких средах [9]. Надо учитывать, что одновременное воздействие на искроплазменный канал и прилегающие к нему объемы жидкостей первичных и вторичных электрофизических процессов, возникающих в компактных электроразрядных системах, обычно нарушает законы физического подобия при анализе влияния энергетических и динамических характеристик этих систем на силовые возмущения в жидких средах.

Приведенные обстоятельства, с одной стороны, вызывают необходимость поиска новых подходов для интенсификации электроимпульсной обработки металлических расплавов, в том числе подходов, основанных на повышении компактности конструкций высоковольтных электроразрядных систем и металлургических агрегатов, в которых жидкие металлы обрабатываются электроимпульсными разрядами. С другой стороны, возникает необходимость создания экспериментальных компактных электроразрядных систем для проверки на практике получаемых теоретических результатов и рекомендаций. Отметим также, что создание компактных высоковольтных разрядно-импульсных систем позволяет также упрощать оперативное их перемещение от одного технологического участка цеха к другому и уменьшать количество применяемого в цеху высоковольтного оборудования [1, 3, 5–7].

Таким образом, *целью данной работы* были разработка научных подходов и принципов построения высоковольтных компактных разрядно-импульсных систем для формирования в ограниченных объемах жидких металлов импульсов тока с высокими удельными энергетическими и динамическими характеристиками, а также создание экспериментальных образцов таких систем для проверки теоретических результатов. Для этого необходимо было уменьшить конструкции высоковольтного генератора (в первую очередь, блоков и элементов его разрядного контура) и металлургического агрегата для обработки расплавов металлов сильноточными электроимпульсными разрядами.

В настоящее время в технологиях электроимпульсной обработки жидких металлов наиболее часто применяют разработанные в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины генераторы типа ГИТ50-5/4-20, в которых реализуются такие параметры: напряжение заряда батареи накопительных конденсаторов – до 50 кВ; энергия, накапливаемая в конденсаторах, – от 5 до 40 кДж; частота следования разрядных импульсов – от 0,5 до 8 имп/с; мощность, выделяемая в нагрузке, – от 20 до 100 кВт.

Учитывая тенденцию перехода современных металлургических и литейных производств к малотоннажному литью цветных металлов массой от 5 до 1000 кг [7], применение мощных материалоемких генераторов импульсных токов типа ГИТ50-5/4-20 является малоэффективным из-за использования их установленной мощности не более чем на 10...30 %. При этом каждый такой генератор надо стационарно размещать в отдельном помещении, в котором должны быть система вентиляции с очисткой воздуха для стабильной работы разрядного коммутатора и специальный маслоприемник на случай аварийного вытекания масла.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что при оптимизации конструкции разрядного контура ГИТ, а также конфигурации разрядных электродов и внутренних объемов металлургических агрегатов, в которых производится электроимпульсная обработка кристаллизующихся алюминиевых сплавов, наиболее целесообразными являются такие режимы обработки и параметры генераторов: длительность электроимпульсной обработки – до 5 мин; длительность технологической паузы между обработками – до 20 мин; напряжение заряда батареи накопительных конденсаторов – до 50 кВ; энергия, накапливаемая в конденсаторах, – до 4 кДж; частота следования разрядных импульсов – до 6 имп./с.

Структурная схема высоковольтной компактной электротехнической системы для обработки кристаллизующихся алюминиевых сплавов электроимпульсными разрядами с высокими удельными энергетическими и динамическими показателями показана на рис. 1. Такую схему можно представить в виде двух подсистем:

– электроразрядной системы (ЭРС), включающей в себя блок зарядного устройства (ЗУ₁), емкостный накопитель энергии (ЕНЭ), коммутирующее устройство (КУ), блок электромагнитной обработки (БЭМО), пульт управления (ПУ₁) и киловольтметр;

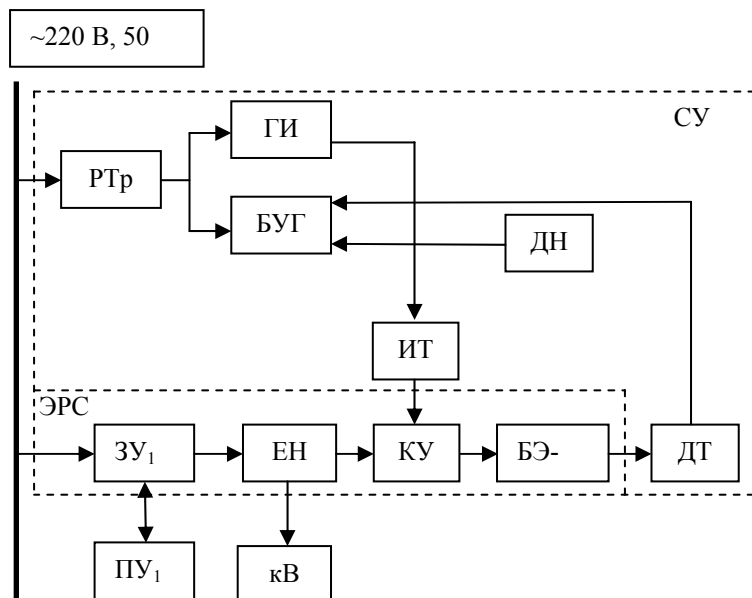


Рис. 1

– системы управления (СУ), содержащей регулируемый трансформатор (РТр), блок управления генератором (БУГ) разрядных импульсов, генератор прямоугольных импульсов (ГИ), импульсный трансформатор (ИТ), датчик значений тока и напряжения (соответственно ДТ и ДН).

Первоочередной является минимизация токоограничивающих элементов зарядной цепи ЕНЭ и высоковольтного трансформатора ГИТ, которые имеют самые большие размеры. Для приведенного диапазона энергетических параметров электроимпульсной обработки расплавов металлов в качестве высоковольтного трансформатора был выбран трансформатор-выпрямитель ОМТВ5/50 УХЛ4, разработанный в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины, и многократно использовался для проведения физических исследований [1, 2]. Согласно паспортному режиму работы данного трансформатора, при выходном напряжении 50 кВ (50 Гц) и выходной мощности 5 кВт, его можно эксплуатировать 30 мин с 30-минутным технологическим перерывом.

Испытания показали, что при работе трансформатора в составе высоковольтной компактной электроразрядной системы электрогидравлической обработки кристаллизующихся алюминиевых расплавов такой трансформатор-выпрямитель целесообразно включать на время не более 5 мин с последующим 20-минутным технологическим перерывом. При электрогидравлической обработке других расплавов время допустимой работы и необходимой технологической паузы для трансформатора-выпрямителя необходимо уточнять из его тепловых режимов, получаемых из прямых экспериментов.

Испытания показали, что при работе трансформатора в составе высоковольтной компактной электроразрядной системы электрогидравлической обработки кристаллизующихся алюминиевых расплавов такой трансформатор-выпрямитель целесообразно включать на время не более 5 мин с последующим 20-минутным технологическим перерывом. При электрогидравлической обработке других расплавов время допустимой работы и необходимой технологической паузы для трансформатора-выпрямителя необходимо уточнять из его тепловых режимов, получаемых из прямых экспериментов.

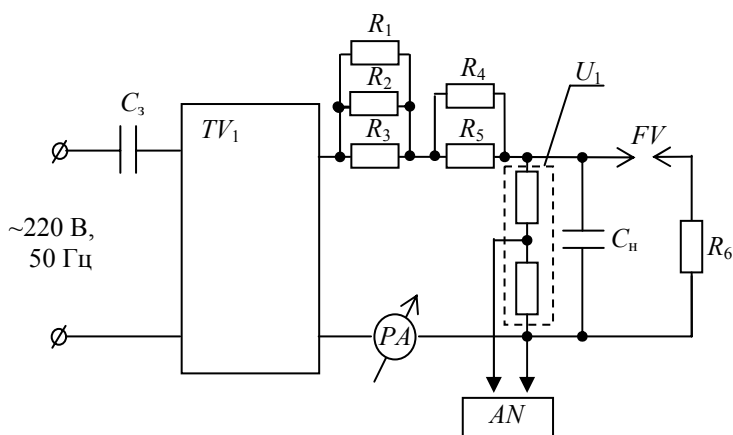


Рис. 2

На рис. 2 представлена схема экспериментального стенда, разработанного для испытания трансформатора. В его состав входят: батарея токоограничивающих конденсаторов C_0 , трансформатор-выпрямитель ОМТВ 5/50, безындуктивные резисторы ТВО–60 3,3 кОм, миллиамперметр РА, высоковольтный делитель напряжения U_1 , запоминающий осциллограф АН, батарея конденсаторов C_n , эквивалентная активная

нагрузка R_6 , разрядник неуправляемый FV .

В этой конструкции ГИТ применялось токоограничение зарядного тока на стороне низкого напряжения трансформатора с помощью емкостей C_0 , что позволило упростить конструкцию высоковольтного оборудования, повысить коэффициент мощности, потребляемой от сети, и снизить стоимость всего электротехнического оборудования.

Разработана инженерная методика расчета величины зарядной емкости. Суть ее состоит в следующем: поскольку активное сопротивление первичной обмотки мало (для ОМТВ сопротивление первичной обмотки по постоянному току составляет величину около 0,23 Ом), то основное падение напряжения цепи будет происходить на токоограничивающем сопротивлении. Поэтому величину реактивного сопротивления ограничивающей емкости ($X_{сзар}$) можно найти из выражения

$$X_{сзар} = U_{\text{лин}}^2 / P_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность на выходе генератора, а $U_{\text{лин}}$ – линейное напряжение на первичной обмотке трансформатора.

Величина средней мощности $P_{\text{ср}}$ определялась из выражения

$$P_{\text{ср}} = W_0 \cdot f, \quad (2)$$

где f – частота разрядов конденсаторной батареи, а W_0 – запасаемая в них электрическая энергия, которую определяем согласно формуле

$$W_0 = C_n \cdot U^2 / 2, \quad (3)$$

где U – напряжение заряда накопительных конденсаторов ГИТ, а C_n – величина их емкости.

Емкость токоограничивающих конденсаторов C_3 можно найти из выражения

$$C_3 = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f_{\text{пит. сети}} \cdot X_{сзар}), \quad (4)$$

где $f_{\text{пит. сети}}$ – частота питающей сети.

Частота следования разрядных импульсов f устанавливалась из условия перегрузки трансформатора в 1,5...1,8 раза по току заряда конденсаторов I_3 (при рекомендуемом номинальном зарядном токе около 0,1 А). Изменялась также величина емкости конденсаторной батареи C_n и запасаемой в ней электрической энергии W_0 . Энергетические режимы испытаний приведены в табл. 1.

Трансформатор-выпрямитель выходил на установившийся температурный режим за один час работы ГИТ (без учета технологических перерывов) при частоте разрядных импульсов $f = 2$ имп./с и запасаемой в конденсаторах энергии W_0 2,5 кДж. Температура масла в трансформаторе была не более чем на 13 °С выше температуры окружающей среды. Кратковременный ток в обмотках трансформатора был в 1,8 раза больше, чем длительно рекомендуемый. Для работы трансформатора это является допустимым режимом.

Особенностью трансформатора-выпрямителя является то, что с целью уменьшения массогабаритных и энергетических показателей каждый из высоковольтных изоляторов выполнен с дополнительными проходными полостями, в каждой из которых размещен дополнительный выпрямительный элемент, подсоединенный к соответствующим выводам вторичной обмотки, образуя при этом мостовой выпрямитель.

На основании проведенных исследований указанного трансформатора-выпрямителя был создан малогабаритный генератор импульсных токов, электрическая схема которого показана на рис. 3.

Таблица 1

C_0 , мкФ	W_0 , кДж	f , имп./с	I_3 , А	Мощность от сети, кВА
1	1,25	2,0	0,085-0,09	5,00
		3,0	0,130-0,140	7,50
2	2,50	1,0	0,080-0,100	5,00
		2,0	0,160-0,180	10,00
3	3,75	0,5	0,035-0,085	3,75
		1,0	0,100-0,140	7,5

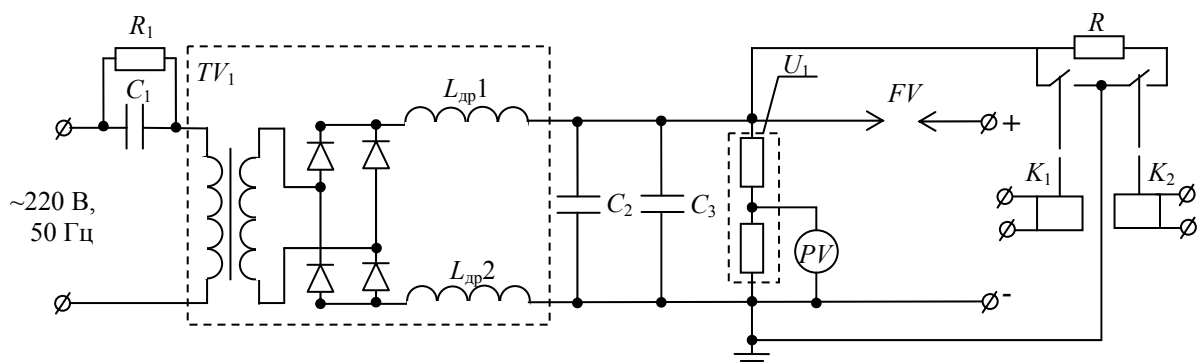


Рис. 3

В состав генератора разрядных импульсов, схема которого показана на рис. 3, входят: шунтирующий резистор R_1 , токоограничивающая емкость C_1 , повышающий трансформатор-выпрямитель TV_1 , накопительные конденсаторы C_2 и C_3 , разрядник FV , высоковольтный делитель напряжения U_1 , киловольтметр PV , коммутаторы электроблокировки K_1 и K_2 , разрядный резистор R , демпфирующие дроссели $L_{др1}$ и $L_{др2}$. Конструктивно генератор выполнен в едином блоке с трансформатором-выпрямителем и конденсаторной батареей, состоящей из двух конденсаторов типа ИКУ50-1 или ИКУ50-0,5.

Номинальные значения емкости конденсаторов определяют запасаемую энергию и частоту следования импульсов тока. Таким образом, в одном блоке мы можем реализовать четыре модификации генератора, представленные в табл. 2. Подключается генератор к питающей сети напряжением 220 В частотой 50 Гц, его масса составляет до 200 кг, а габаритные размеры не более $1000 \times 600 \times 1000$ мм.

Поскольку сопротивления $R_1 \dots R_5$ на рис. 2 выполняют лишь функцию защиты высоковольтных диодов от обратной полуволны импульса тока, то в опытно-промышленном образце генератора они были заменены дросселями $L_{др1}$ и $L_{др2}$, индуктивность которых выбиралась из условия, что реактивное сопротивление дросселя X_L должно равняться активному демпфирующему сопротивлению, которое может изменяться от 6 до 16 кОм, а частота разрядного тока $f_{разр}$ – от 30 до 100 имп./с. Поэтому величина индуктивности дросселя выбиралась из выражения

$$L_{др} = X_{Lзар} / (2 \cdot \pi \cdot f_{разр}). \quad (5)$$

Демпфирующие дроссели монтировались непосредственно на изоляторах трансформатора-выпрямителя. Масса масла в трансформаторе составляла около 27 кг, поэтому в соответствии с требованиями ПУЭ [6] для него не нужно изготавливать специальный приямок на случай аварийного вытекания масла, и он не требует установки в специальном помещении. Кроме этого, корпус ГИТ выполнен из металла и вместе с технологическим узлом заземляется на цеховой контур заземления, сопротивление которого должно быть не более 4 Ом, то есть не требуется устанавливать отдельный контур заземления.

Для повышения безопасности и ресурса работы ГИТ были разработаны принципы работы и конструкция электроблокиратора – устройства для принужденного разряда конденсаторов [12].

Таблица 2

Тип генератора	C_0 , мкФ	W_0 , кДж	f , имп./с	Мощность от сети, кВА
ГИТ-50-0,625/0,5	0,5	0,625	6,0	7,5
ГИТ-50-1,25/1	1,0	1,250	3,0	7,5
ГИТ-50-1,75/1,5	1,5	1,750	2,0	7,0
ГИТ-50-2,5/2	2,0	2,500	1,0	5,0

Устройство выполнено в виде двух пар неподвижных контактов, изготовленных в форме шаров, установленных на вертикальных стойках, два подвижных замыкателя имеют форму торцов и установлены на изоляционных штангах. Расстояние между одной парой неподвижных контактов устанавливается в соответствии с пробивным напряжением, необходимым для защиты от перена-

пряжения конденсаторной батареи. При подаче напряжения на катушки электромагнитов K_1 и K_2 их якоря втягиваются и изоляционные штанги поднимают замыкатели. При снятии напряжения с катушек электромагнитов первой движется штанга электромагнита K_1 и замыкает неподвижные контакты, разряжая конденсаторные батареи C_2 , C_3 на токоограничивающий резистор R . Далее, с запаздыванием движется вторая штанга и замыкает вторую пару неподвижных контактов. Запаздывание в движении второй штанги обеспечивается специальным пазом, выполненным на штанге, и зигзагообразным рычагом, который движется в этом пазу.

При аварийном повышении напряжения на конденсаторной батарее пробивается воздушный промежуток между шарами, и конденсаторная батарея разряжается на токоограничивающий резистор R . Разряд батареи будет продолжаться до тех пор, пока система автоматического отключения не отключит ГИТ от системы питания, что позволяет существенно увеличить срок службы дорогостоящих высоковольтных конденсаторов и другого высоковольтного оборудования.

Внешний вид и компоновка генератора импульсных токов представлены на рис. 4.

Управление ГИТ осуществлялось дистанционно с помощью мобильного пульта управления. Простота конструкции генератора обеспечивала его высокую степень ремонтпригодности. Оптимизация конструкций блоков разрядного контура, электродов и агрегатов электроимпульсной обработки кристаллизующихся алюминиевых сплавов позволяла дополнительно повышать интенсивность такой обработки за счет наложения в локальных объемах расплавов первичных и вторичных импульсных электрофизических процессов.

Данный генератор прошел успешные лабораторные испытания в Институте импульсных процессов и технологий НАН Украины (г. Николаев), Физико-техническом институте металлов и сплавов НАН Украины (г. Киев) и промышленную апробацию на ГП НПКГ "Зоря-Машпроект" (г. Николаев).

Выводы. 1. Разработанные научные подходы и принципы построения высоковольтных компактных разрядно-импульсных систем для формирования в жидких металлах импульсов тока с высокими удельными энергетическими и динамическими характеристиками позволяют дополнительно повышать силовое воздействие на кристаллизующиеся расплавы за счет оптимизации конструкций блоков разрядного контура, электродов и агрегатов, в которых производится электроимпульсная обработка расплавов.

2. Разработаны методика определения основных энергетических параметров и режимов работы высоковольтных электроразрядных систем, а также рекомендации относительно уменьшения их массогабаритных показателей за счет оптимизации конструкций трансформатора и токоограничивающих элементов, а также взаимного расположения блоков генератора разрядных импульсов в одном корпусе.

3. Разработанная структура малогабаритного ГИТ позволяет создавать малогабаритные зарядные устройства для высоковольтных электротехнических комплексов электрогидравлической обработки кристаллизующихся металлических расплавов и может быть использована для решения задачи обеспечения надежной и эффективной защиты обслуживающего персонала и электротехнического оборудования от воздействия высоких напряжений.

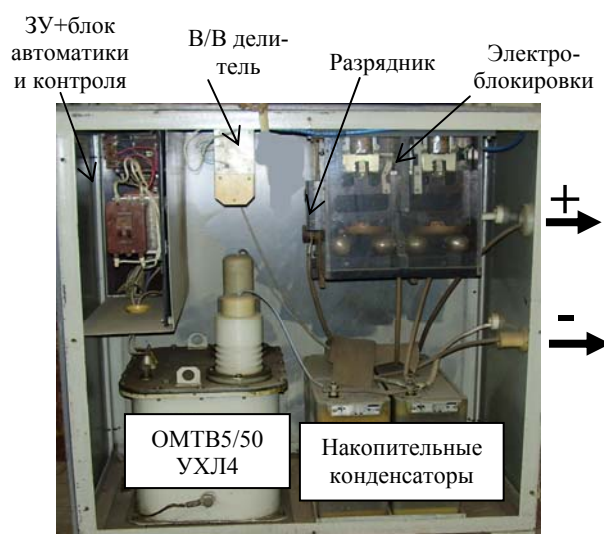


Рис. 4

2. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины (обзор) // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 69–74.
3. Волков Г.В., Грабовый В.М., Синчук А.В. Обработка чугуна концентрированными потоками энергии // Литейное производство. – 1998. – № 1. – С. 12–14.
4. Гулий Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наук. думка, 1990. – 208 с.
5. Найдек В.Л. Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового использования // Современное материаловедение XXI века. – К.: Наук. думка, 1998. – С. 133–164.
6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей / Минэнерго СССР. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 391 с.
7. Семенова Т.В. Прогнозирование развития основных технологических процессов в литейном производстве Украины // Теория и практика металлургии. – 2004. – № 2. – С. 22–25.
8. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в цепях заряда и разряда конденсатора электроимпульсных установок. – К.: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.
9. Щерба А.А., Дубовенко К.В. Высоковольтные электроразрядные компактные системы. – К.: Наук. думка, 2008. – 269 с.
10. Щерба А.А., Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Развитие метода разностных уравнений для анализа переходных процессов в цепях электроразрядных установок при стохастическом изменении сопротивления нагрузки // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 3–11.
11. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 3–9.
12. Пат. 4121 Украина, Н03К3/53, Н02Н7/16. Устройство для разряда конденсаторной батареи генератора импульсных токов / С.А. Козак, Ю.Г. Бойченко, Я.П. Струк, Е.П. Разменов. – Опубл. 17.01.2005. Бюл. № 1.

УДК 621.316:621.373

Щерба А.А.¹, чл.-кор. НАН України, **А.В. Иванов²**, мол. наук. співр.

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

2 – Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,
пр. Жовтневий, 43-а, Миколаїв, 54018, Україна

Електротехнічні компактні системи обробки розплавів металів високовольтними електророзрядними імпульсами

Розроблено принципи побудови високовольтних компактних електротехнічних систем обробки розрядними імпульсами металевих розплавів, що кристалізуються. Наведено структурну схему таких систем для генерування великих імпульсних потужностей із взаємним накладанням первинних і вторинних електрофізичних впливів. Визначено оптимальні діапазони змінення енергетичних і динамічних параметрів високовольтних генераторів розрядних імпульсів та шляхи зменшення масогабаритних показників генераторів і реалізації компактних розрядно-імпульсних систем електрогідравлічної обробки рідких металів. Бібл. 12, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: компактна електророзрядна система, імпульс, струм, потужність, розплав, метал, силовий вплив, накладання.

A.A. Shcherba¹, **A.V. Ivanov²**

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

2 – Institute of pulse processes and technologies NAS of Ukraine,
pr. Zhovtnevyi, 43-a, Mykolayiv, 54018, Ukraine

Electrotechnical compact systems for treatment of metals melts with high-voltage electro-discharge pulses

Principles of construction of high-voltage compact electrotechnical systems for treatment of crystallizing metals melts with electro-discharge pulses are developed. The block diagram of such systems for generation of the high pulsing powers and formation of high density of energy with mutual superposition of primary and secondary electro-physical influences in local volumes of melts is given. The optimal change ranges of power and dynamic parameters of high-voltage generators of discharge pulses, as well as the ways for decrease of mass-dimensional parameters of generators and implementation of compact discharge-pulses systems for electro-hydraulic treatment of liquid metals are defined.

Reference 12, figures 4, tables 2.

Key words: compact electro-discharge system, pulse, current, power, melt, metal, power influence, superposition.

Надійшла 6.09.2013

Received 6.09.2013