

УДК 537.528: 621.313

ГЕНЕРАТОР УДАРНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВАХ

© 2022 г. Ю. Г. Шмигирилов^{1,*}, Б. А. Франковский²

¹ Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Димитровград, 433511, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия
*e-mail: shug555@mail.ru

Поступила в редакцию 13.02.2022 г.

После доработки 14.02.2022 г.

Принята к публикации 22.02.2022 г.

Представлены результаты исследований генераторов ударной мощности и систем инициирования разряда с целью оценки эффективности их применения в электроразрядных устройствах и, в частности, для электрогидравлических технологий. Выполнен сравнительный анализ трех вариантов инициирования разряда генератора: высоковольтным пробоем от предварительно заряженной конденсаторной батареи; высоковольтным пробоем от вспомогательной высоковольтной обмотки генератора; взрывающимися металлическими вставками. Показано, что предварительное короткое замыкание генератора с мгновенной сменой режима короткого замыкания на режим электродугового разряда, вызывает форсированный ввод энергии в канал разряда. Данный способ разряда генератора реализован применением взрывающихся проводников. Инициирование разряда взрывающимися проводниками позволяет отказаться от высоковольтной конденсаторной батареи и средств ее заряда, но требует механической замены проводников, что влияет на частоту следования импульсов. Получить более высокую частоту импульсов, без высоковольтной конденсаторной батареи и средств ее заряда, позволяет конструкция генератора ударной мощности с дополнительной высоковольтной обмоткой. Инициирование разряда генератора высоковольтным пробоем, без предварительного короткого замыкания рабочей обмотки генератора, уступает по эффективности возбуждения ударных волн давления инициированию взрывающимися проводниками.

Ключевые слова: генератор ударной мощности, электрический конденсатор, электрический разряд, электроразрядные технологии

DOI: 10.56304/S2304487X22010096

Высоковольтные импульсные электрические разряды в конденсированных средах, сопровождающиеся быстрым выделением энергии в канале разряда ($10^{-5} \dots 10^{-3}$ с), формируют ударные волны давления с амплитудой в канале разряда до 10^9 Па. Подобный импульс механической энергии, сформированный в конденсированной среде, используется в таких технологиях, как штамповка, деформация, дробление, уплотнение, запрессовка труб, очистка труб, сейсморазведка и т.д. [1–4].

В стационарных устройствах электроразрядных технологий генератор импульсных токов включает: батарею импульсных высоковольтных конденсаторов, высоковольтный трансформатор для повышения напряжения сети до требуемой величины, высоковольтный выпрямительный блок и высоковольтное коммутирующее устройство. В автономных передвижных установках подобная система дополняется первичным источником энергии – электромеханическим генера-

тором с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Вследствие массогабаритных ограничений энергия конденсаторных батарей передвижных автономных систем для электрогидравлических технологий не превышает 30 кДж [3, 4].

Сравнительный анализ технико-экономических показателей существующих накопителей энергии для автономных электрофизических установок показал целесообразность применения в качестве накопителя и источника импульсной энергии специальных электрических машин – генераторов ударной мощности [5, 6]. У генератора массой 5т, имеющего конструктивное исполнение по типу турбогенератора, ротор, вращающийся с частотой 3000–6000 об/мин, обладает кинетической энергией ~400–1600 кДж.

Предварительные расчеты генератора ударной мощности с амплитудой ЭДС 15–20 кВ, достаточной для пробоя межэлектродного промежутка в воде 0.01–0.02 м, показали неэффективность дан-

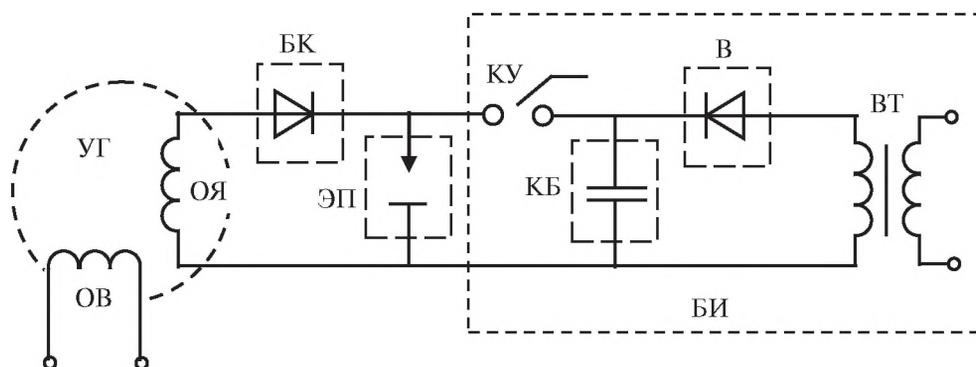


Рис. 1. Электрическая схема силовой части электроразрядной установки с инициированием разряда генератора высоковольтной конденсаторной батареей: УГ – генератор ударной мощности; ОВ – обмотка возбуждения генератора; ОЯ – обмотка якоря генератора; ВБ – вентильный блок; БИ – блок инициирования; КБ – высоковольтная конденсаторная батарея; ВТ – высоковольтный трансформатор; В – выпрямитель; КУ – коммутирующее устройство (триггер); ЭП – электроискровой преобразователь – разрядник.

ного варианта из-за несогласованности сопротивления генератора и сопротивления электроискрового промежутка в фазе дугового разряда. При электрическом пробое межэлектродного промежутка амплитуда тока короткого замыкания определяется ударным индуктивным сопротивлением генератора, которое на порядок выше сопротивления межэлектродного разрядного промежутка. Генераторы ударной мощности с сопротивлением близким к сопротивлению межэлектродного промежутка имеют напряжение недостаточное для пробоя межэлектродного промежутка. Разряд такого генератора необходимо инициировать вспомогательными средствами.

В работе предложены и исследованы три способа инициирования разряда генератора: 1) высоковольтным пробоем от предварительно заряженной конденсаторной батареи; 2) высоковольтным пробоем от вспомогательной высоковольтной обмотки генератора; 3) инициированием разряда взрывающимися металлическими вставками.

На рис. 1 приведена принципиальная электрическая схема разрядно-импульсной установки с инициированием разряда генератора высоковольтным пробоем от предварительно заряженной конденсаторной батареи.

В спроектированной разрядно-импульсной установке для сейсморазведочных работ в качестве приводного двигателя использовался двигатель внутреннего сгорания автомобиля, на платформе которого располагалась установка. При работе генератор, приводимый во вращение от двигателя автомобиля, аккумулирует кинетическую энергию в маховых массах ротора. При достижении заданной частоты вращения осуществляется форсированное возбуждение генератора. Напряжение генератора в виде положительной полуволны приложено через вентильный блок ВБ к электродам разрядника ЭП, помещенного в во-

ду. Одновременно, через высоковольтный трансформатор ВТ и выпрямитель В, заряжается конденсаторная батарея КБ. Момент инициирующего разряда конденсаторной батареи синхронизируется с определенным фазовым углом напруги генератора и реализуется включением высоковольтного коммутирующего устройства КУ.

Переходные процессы в цепи разрядных контуров конденсаторной батареи и генератора включают три стадии:

1. Иницирующий разряд конденсаторной батареи до момента перехвата электроискрового разряда генератором в течение времени t_1 . Описывается дифференциальным уравнением:

$$L_c \frac{di_c}{dt} + r_c i_c + r_p(t) i_c + \frac{1}{C} \int i_c dt = 0, \quad (1)$$

где L_c, r_c – индуктивность и активное сопротивление разрядного контура конденсаторной батареи емкостного накопителя; $r_p(t)$ – нелинейное сопротивление разрядного промежутка; C – емкость конденсаторной батареи.

2. Совместная работа ударного генератора и конденсаторной батареи на дуговой разряд. Описывается системой уравнений:

$$L_c \frac{di_c}{dt} + r_c i_c + r_p(t) i_p + \frac{1}{C} \int i_c dt = 0;$$

$$L_r \frac{di_r}{dt} + r_r i_r + r_p(t) i_p = U_m \sin[\omega(t - t_1) + \psi]; \quad (2)$$

$$i_p = i_c + i_r;$$

где U_m – амплитуда напряжения генератора; L_r, r_r – индуктивность и активное сопротивление разрядного контура генератора; i_r – ток генератора; ψ – фазовый угол напряжения генератора, при котором мгновенное напряжение генератора равно напряжению конденсатора, $u_r(t) = u_c(t)$.

3. Самостоятельная работа генератора. Описываются только дифференциальным уравнением цепи разряда генератора, приведенным выше.

При переходе тока генератора через нуль вентильный блок ВБ разрывает цепь генератора, и дуга гаснет. Для того, чтобы повторить разряд, необходимо вновь зарядить конденсаторную батарею блока инициирования. Частота повторения разрядов генератора определяется частотой напряжения генератора и временем зарядки конденсаторной батареи.

В экспериментах и расчетах в качестве генератора ударной мощности использовался серийный трехфазный синхронный генератор СГ-12-46-6 с форсированной системой самовозбуждения и приводом от двигателя с частотой вращения $n = 1500$ об/мин.

Исследования показали, что стабильность инициирующих разрядов определяется взаимозависимостью межэлектродного расстояния и напряжения: для расстояния $l_3 \leq 0.01$ м необходимо напряжение не ниже 10 кВ, а для $l_3 \leq 0.02$ м не ниже 15 кВ. В экспериментах напряжение инициирования не превышало $U_{C0} = 17.5$ кВ, а энергия конденсаторной батареи $W_{C0} = 460$ Дж. Было установлено, что инициирующий разряд конденсаторной батареи вызовет разряд генератора, если его напряжение в момент пробоя 100 В и выше на сантиметр длины межэлектродного промежутка, что позволило в свою очередь исследовать и рекомендовать диапазон фазовых углов мгновенного напряжения генератора для синхронизации с разрядом конденсаторной батареи (табл. 1).

По результатам исследований электрических характеристик разряда конденсаторной батареи и генератора в воде были получены аналитические выражения для сопротивления канала электроискрового разряда $r_p(t)$ [7].

В генераторах с традиционной зубцовой зоной статора или с беззубцовым статором свободная треть пазов (или расточки) однофазного статора может быть использована для размещения дополнительной высоковольтной обмотки, предназначенной для инициирования разряда рабочей, низковольтной. Разместить подобную обмотку на серийном синхронном генераторе СГ-12-46-6 не представлялось возможным. Для экспериментальных исследований генератора ударной мощности с инициирующей высоковольтной обмоткой были изготовлены модельные генераторы в габаритах асинхронного рольгангового двигателя АР-6 “НПО Сибэлектромотор”: с продольной высоковольтной обмоткой, т.е. соосно с рабочей низковольтной, и с поперечной высоковольтной обмоткой, т.е. со сдвигом осей рабочей и высоковольтной обмоток на угол $\pi/2$ (рис. 2).

Таблица 1. Характеристика электрических разрядов генератора СГ-12-46-6, инициированных импульсным высоким напряжением конденсаторной батареи

ψ , рад	I_{pm} , А	W_p , Дж	$r_{p\ min}$, Ом	t_p , мс	N_m , МПа	Примечание
$\pi/4$	8500	4425	0.015	13.3	0.78	$l_3 = 0.006$ м; $U_C = 15$ кВ; $W_{C0} = 337$ Дж; $E_m = 1130$ В
$\pi/3$	7320	3885	0.016	12.0	1.29	
$\pi/2$	6350	1842	0.016	10.3	0.58	

Таблица 2. Обобщенные результаты исследования энергетических характеристик разрядов высоковольтной (ВО) и рабочей (РО) обмоток (E_m – амплитуда ЭДС I_{mp} – амплитуда тока разряда; W_p – энергия, введенная в канал разряда; $l_3 = 0.005$ м)

Модель	Обмотка	E_m , В	I_{mp} , А	W_p , Дж
С продольной обмоткой	ВО	6000	19.7	13.9
	РО	159	822	172
С поперечной обмоткой	ВО	6000	43.8	24.1
	РО	159	1100	729

В таблице 2 приведены обобщенные результаты исследования самостоятельных разрядов продольной и поперечной высоковольтных обмоток, и разрядов рабочей обмотки, инициированных напряжением высоковольтных обмоток.

Энергетические характеристики модельных генераторов не сопоставимы с показателями генератора СГ-12-46-6, однако проведенные исследования подтвердила эффективность данного

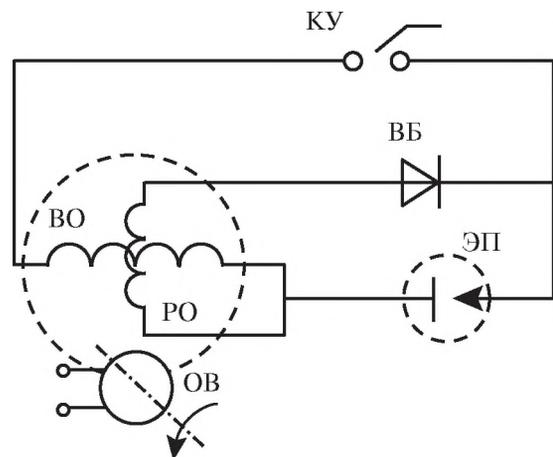


Рис. 2. Электрическая схема силовой части электро-разрядной установки с иницированием разряда генератора ударной мощности поперечной высоковольтной обмоткой: РО – рабочая низковольтная обмотка; ВО – высоковольтная обмотка.

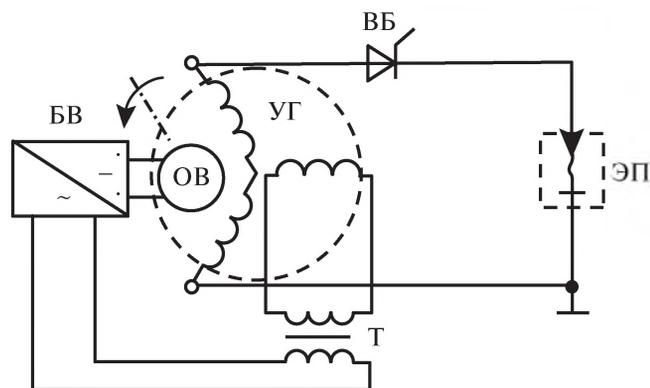


Рис. 3. Электрическая схема силовой части электро-разрядной установки с иницированием разряда генератора ударной мощности взрывающимися проводниками.

способа иницирования разряда и позволили установить, что из двух конструктивных решений размещения высоковольтных обмоток предпочтительным является вариант с поперечной обмоткой, имеющей более высокие энергетические показатели [8].

Основные достоинства генератора ударной мощности с дополнительной высоковольтной обмоткой для электроразрядных устройств: отсутствие блока иницирования с батареей высоковольтных конденсаторов, высокая частота генерирования волн давления.

Отказаться от блока иницирования позволяет метод иницирования разряда с помощью металлических вставок, взрывающихся в межэлектродном промежутке в процессе иницирования разряда. В экспериментальных исследованиях с использованием генератора СГ-12-46-6 в качестве взрывающегося проводника использовалась медная проволока диаметром 1.0–1.5 мм. Отсутствие необходимости защиты обмотки якоря от высокого напряжения позволило заменить высоковольтный вентиляционный блок коммутации на тиристорный блок, рассчитанный только на обратное напряжение генератора (рис. 3).

Процесс иницирования разряда взрывающимся проводником качественно отличается от процесса иницирования высоковольтным пробоем. Его условно можно разделить на три стадии. Первая стадия: режим внезапного короткого замыкания, при котором кинетическая энергия вращающегося ротора преобразуется в электромагнитную в полях рассеяния обмоток генератора. Небольшая часть этой энергии преобразуется в тепловую энергию активных сопротивлений цепи и, в частности, сопротивления проволочной перемычки, вызывая ее взрывной распад.

Взрыв проводника соответствует началу второй стадии. Резкое увеличение сопротивления

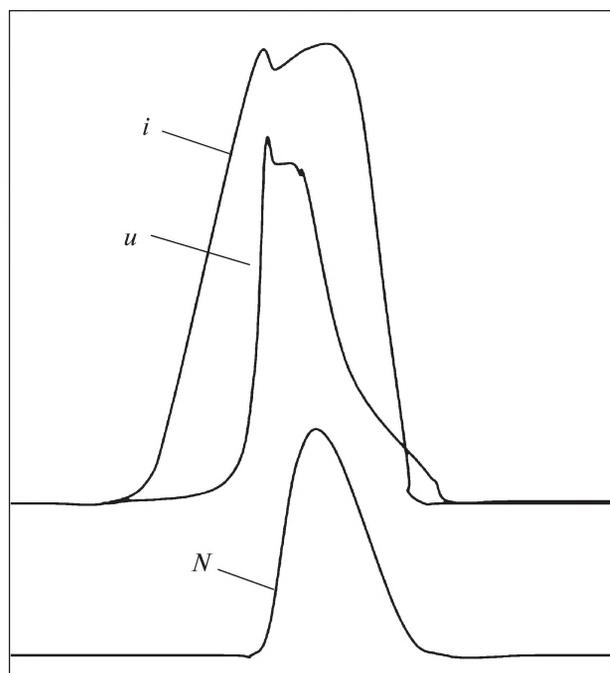


Рис. 4. Осциллограммы: тока в цепи разряда (i), напряжения на электродах электрогидравлического излучателя (u) и импульса давления (N).

межэлектродного промежутка, при токе короткого замыкания обмотки статора в момент коммутации $I_{КЗ}$, вызывает скачок напряжения в межэлектродном промежутке, $u \approx r_p(t)I_{КЗ}$, с последующим электрическим пробоем межэлектродного промежутка по продуктам распада медного проводника. Этот процесс сопровождается взрывным характером перехода электромагнитной энергии разрядного контура в тепловую энергию возникающего плазменного межэлектродного канала. Разряд генератора, на плазменный канал (третья стадия) завершается при достижении током нулевого значения.

На рис. 4 приведены характерные осциллограммы описываемого процесса разряда генератора СГ-12-46-6: ток разряда $i(t)$, напряжение между электродами $u(t)$ и импульс давления $N(t)$.

Эффективность преобразования электромагнитной энергии в работу волны давления зависит от множества факторов, но прежде всего от скорости ввода энергии в канал разряда, а это в свою очередь, связано величиной тока в момент взрыва проводника. Известно, что при внезапном коротком замыкании синхронного генератора в момент максимального потокоцепления обмотки статора с основным магнитным потоком, т.е. в момент перехода мгновенной ЭДС через ноль ($e = E_m \sin \omega t = 0$), ток короткого замыкания содержит, кроме переменной составляющей, аперио-

Таблица 3. Обобщенные результаты исследования временных характеристик разрядов генератора СГ-12-46-6 (I_m – амплитуда тока разряда генератора; W_p – энергия разряда генератора; P_m – максимальная мощность разряда; N_m – амплитуда импульса давления)

Метод инициирования	E_m , В	I_m , А	W_p , кДж	P_m , МВт	N_m , МПа
Высоким напряжением	1130	7320	3.89	0.98	1.29
Взрывающимся проводником	1130	11000	12.60	5.60	7.85

дическую. Ударный ток короткого замыкания), при $\omega t \approx \pi$ достигает:

$$I_{уд} = \frac{2E_m}{\sqrt{x_{уд}^2 + r_1^2}} k_3, \quad (3)$$

где E_m – амплитуда ЭДС обмотки статора перед внезапным коротким замыканием; k_3 – коэффициент затухания ударного тока; r_1 – активное сопротивление обмотки статора; $x_{уд}$ – индуктивное сопротивление обмотки статора, соответствующее ударному току.

Фазовый угол взрыва проводника ψ , с привязкой к началу процесса короткого замыкания, при постоянстве: начала короткого замыкания ($\omega t \approx 0$), амплитуды ЭДС E_m и межэлектродного расстояния l_3 , зависит от диаметра проводника d_{II} . Предполагалось оптимальным взрыв проводника в момент достижения током максимума ($\psi = \pi$), но в экспериментах с генератором СГ-12-46-6 наилучшие результаты в формировании импульса давления были получены при взрыве проводника в момент $\psi \approx (0.6-0.65)\pi$, что соответствовало $d_{II} = 1.2$ мм ($E_m = 1130$ В; $l_3 = 0.06$ м).

Сравнительная оценка эффективности методов инициирования по скорости ввода энергии в канал разряда и амплитуде импульса давления, являющегося косвенной мерой полезной работы, свидетельствует о многократном превышении этих параметров у метода взрывающихся проводников над предыдущими методами (табл. 3).

Предварительное короткое замыкание генератора, при котором энергия аккумулируется в виде магнитного поля обмотки статора, обеспечивает высокую скорость ввода энергии в канал разряда и, как следствие, высокую амплитуду импульса давления. Эффективности преобразования энергии генератора в механическую энергию волны давления способствует увеличенная область формирования гидродинамического импульса давления за счет увеличения межэлектродного промежутка.

Основным недостатком системы инициирования с использованием взрывающихся проводников является необходимость периодической ме-

ханической замены короткозамыкающих проводников, что сказывается на частоте следования импульсов давления.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотренные варианты схемных решений электроразрядных устройств для электрогидравлических технологий взаимосвязаны с конструктивным исполнением генератора ударной мощности. При инициировании разряда конденсаторной батареей и взрывающимися проводниками – генератор однофазный. Такой генератор может быть выполнен с полюсными выступами на статоре [9]. Конструктивное исполнение генератора с дополнительной высоковольтной обмоткой для инициирования разряда позволяет отказаться от блока инициирования с использованием конденсаторной батареи.

2. Предварительное короткое замыкание генератора, при котором энергия вращающегося ротора преобразуется в энергию магнитного поля обмотки статора, с мгновенной сменой режима короткого замыкания на режим электродугового разряда, вызывает форсированный ввод энергии в канал разряда, что, в свою очередь, обеспечивает наиболее эффективное преобразование электромагнитной энергии в работу сил волны давления.

3. Инициирование разряда генератора взрывающимися проводниками, позволяет реализовать данный способ форсированного ввода энергии в канал разряда, отказаться от высоковольтной конденсаторной батареи и средств ее заряда, но требует устройство автоматической замены короткозамыкающего проводника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. СПб.: Машиностроение, 1986. 252 с.
2. *Лопатин В.В., Сквирская И.И.* Электрический разряд и его технологические применения // Известия ТПУ. 2003. Т. 306. №1. С. 128–132.
3. *Мирзоян Ю.Д.* Источники упругой энергии и возбуждение сейсмических волн при наблюдениях ВСП на море // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2000. № 9. С. 22–28.
4. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки / Под ред. М.Б. Шнеерсона. М.: Изд-во: Недра, 1998. 527 с.
5. *Сипайлов Г.А., Хорьков К.А.* Генераторы ударной мощности. М.: Энергия, 1979. 128 с.
6. *Франковский Б.А., Шмигирилов Ю.Г.* Применение электромашинного генератора для сейсморазведки // Геофизика, 2015. № 1. С. 82–86.
7. *Шмигирилов Ю.Г., Франковский Б.А.* Электрические характеристики подводного разряда генера-

- тора ударной мощности // Вестник НИЯУ МИФИ, 2018. Т. 7. № 4. С. 304–311.
8. Шмигирилов Ю.Г. Иницирование подводного электрического разряда генератора ударной мощности с помощью высоковольтной обмотки // Вестник НИЯУ МИФИ, 2021. Т. 10. № 2. С. 104–111.
9. Шмигирилов Ю.Г. Исследование магнитного поля и гармонического состава ЭДС однофазного генератора ударной мощности // Вестник НИЯУ МИФИ, 2015. Т. 4. № 4. С. 298–303.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2022, vol. 11, no. 1, pp. 87–92

Impact Power Generator in Electric Discharge Devices

Yu. G. Shmigirilov^{a,#} and B. A. Frankovskiy^b

^a *Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Dimitrovgrad, Ulyanivskaya oblast, 433511 Russia*

^b *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia*

[#]*e-mail: shug555@mail.ru*

Received February 13, 2022; revised February 14, 2022; accepted February 22, 2022

Abstract—Impact power generators and discharge initiation systems have been studied in order to evaluate the efficiency of their use in electric discharge devices and, in particular, for electrohydraulic technologies. Three variants of generator discharge initiation—by high-voltage breakdown from a pre-charged capacitor bank, high-voltage breakdown from the auxiliary high-voltage winding of the generator, and exploding metal inserts—have been comparatively analyzed. It has been shown that a preliminary short circuit of the generator with an instantaneous change in the short circuit mode to the electric arc discharge mode causes a forced input of energy into the discharge channel. This method of discharging the generator is implemented using exploding conductors. The initiation of the discharge by exploding conductors makes it possible to abandon the high-voltage capacitor bank and the means of charging it, but requires mechanical replacement of the conductors, which affects the pulse repetition rate. A shock power generator with an additional high-voltage winding makes it possible to obtain a higher pulse repetition rate without a high-voltage capacitor bank and means of charging it. The initiation of a generator discharge by a high-voltage breakdown without a preliminary short circuit of the working winding of the generator is inferior in terms of the efficiency of excitation of pressure shock waves to initiation by exploding conductors.

Keywords: impact power generator, electric capacitor, electric discharge, electric discharge technologies

DOI: 10.56304/S2304487X22010096

REFERENCES

1. Yutkin L.A. *Elektrohidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electro-hydraulic effect and its application in industry]. Leningrad, Mashinostroeniye, 1986. 253 p.
2. Lopatin V.V., Skvirskaya I.I. Elektricheskiy razryad i ego tekhnologicheskie primeneniya [Electric discharge and its technological applications]. *Izvestiya TPU*, 2003, vol. 306, no.1, pp. 128–132. (in Russian)
3. Mirzozan Yu.D. Istochniki uprugoy energii i vzbuzhdeniye seismicheskikh voln pri nabljudeniyah VSP na more [Sources of elastic energy and excitement of seismic waves in the observation of the sea]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefityanyh i gazovyh mestorozhdeniy*, 2000, no. 9, pp. 22–28. (in Russian)
4. *Teoriya i praktika nazemnoj nevzryvnoy sejsmorazvedki / Pod red. M.B. Shneersona* [Theory and practice of non-explosive seismic ground]. Moscow, Nedra Publ., 1998. 527 p.
5. Sipajlov G.A., Horkov K.A. *Generatory udarnoy moshchnosti* [Generators impact power]. Moscow, Energia Publ., 1979. 128 p.
6. Frankovskiy B.A., Shmigirilov Yu.G. Primeneniye elektromashinnogo generatora dlja sejsmorazvedki [Application of an electric machine generator for seismic exploration]. *Geofizika*, 2015, no. 1, pp. 82–86. (in Russian)
7. Shmigirilov Yu.G., Frankovskiy B.A. Elektricheskie harakteristiki podvodnogo razryada generatora udarnoy moshchnosti [Electrical Characteristics of the Underwater Discharge of a Impact Power Generator]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 304–311. (in Russian)
8. Shmigirilov Yu.G. Inicirovaniye podvodnogo elektricheskogo razryada generatora udarnoy moshchnosti s pomoshch'yu vysokovol'noy obmotki [Initiation of the underwater electric discharge of the impact power generator by means of a high-voltage winding]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2021, vol. 10, no. 2, pp. 104–111. (in Russian)
9. Shmigirilov Yu.G. Issledovaniye magnitnogo polya i garmonicheskogo sostava EDS odnofaznogo generatora udarnoy moshchnosti [Study of the magnetic field and harmonic composition of the EMF of a single-phase impact power generator]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2015, vol. 4, no. 4, pp. 298–303. (in Russian)