

## Высоковольтный многоканальный импульсный генератор для электроразрядных технологий

*В.М. Алексеенко<sup>\*</sup>, А.А. Жерлицын, С.С. Кондратьев*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*<sup>\*</sup>alexeenko@oit.hcei.tsc.ru*

**Абстракт.** В работе представлены конструкция и результаты испытаний высоковольтного импульсно-периодического генератора, разработанного для дробления материалов. Принцип работы генератора состоит в импульсной зарядке высоковольтного накопителя с помощью повышающего трансформатора. Высоковольтный накопитель состоит из 4 параллельно включённых ветвей, каждая из которых имеет ёмкость 12.5 нФ. Каждая ветвь подключается к отдельному разрядному контуру в камере дробления. Испытания показали возможность одновременного получения четырёх разрядных каналов в камере дробления. Выходной импульс генератора имел следующие параметры: амплитуда напряжения до 100 кВ, время нарастания напряжения порядка 60 нс, амплитуда разрядного тока до 5 кА на канал и длительность полупериода порядка 0.5 мкс. Исследована как возможность увеличения производительности процесса дробления без увеличения удельных энергозатрат при переходе от одноканального режима дробления к многоканальному, так и фракционный состав продуктов дробления для обоих режимов.

**Ключевые слова:** импульсная техника, высоковольтный импульсно-периодический генератор, дробление высоковольтными импульсами.

### 1. Введение

Дробление высоковольтными импульсами (ВВИ дробление) рассматривается как альтернатива традиционным механическим методам дробления [1–3]. В данной технологии рабочим инструментом является канал разряда, а процесс дробления осуществляется в водной среде. Проводились исследования использования ВВИ дробления для переработки как первичного сырья [3–5], так и вторичного, в том числе стеклотекстолита [6–7], гальванизированных пластиков [8], электронного лома [9], солнечные панели [11–12], шлаков сжигания отходов [13] и бетона [2]. Однако перспективы использования ВВИ дробления не очевидны, так как данный вид дробления имеет высокие удельные энергозатраты, которые для нехрупких материалов (таких как печатные платы) могут превышать 1000 кВт·ч/т. Тогда как для механических методов дробления удельные энергозатраты составляют порядка 100 кВт·ч/т, что на порядок меньше, чем для ВВИ дробления.

В работе [14] проведено численное и экспериментальное исследование влияния условий ввода энергии в канал разряда на эффективность перевода электрической энергии в механическую при ВВИ дроблении. Показано, что для оптимизации параметров генератора с целью уменьшения удельных энергозатрат процесса дробления необходимо стремиться к реализации разрядного контура с величиной критерия подобия  $K = 0.2–0.3$ , где  $K$  зависит от ёмкости и зарядного напряжения накопителя энергии, индуктивности разрядного контура и искровой постоянной канала разряда. Однако уменьшение удельных энергозатрат приводит к одновременному уменьшению производительности процесса дробления. Для одновременного обеспечения низких удельных энергозатрат и высокой производительности процесса дробления предложено использовать систему параллельных искровых каналов [14].

В данной работе представлены конструкция и результаты испытаний портативного высоковольтного генератора с четырьмя независимыми разрядными контурами, разработанного для ВВИ дробления и других технологических применений. Исследована как возможность увеличения производительности процесса дробления без увеличения удельных

энергозатрат при переходе от одноканального режима дробления к многоканальному, так и фракционный состав продуктов дробления для обоих режимов.

## 2. Конструкция высоковольтного многоканального генератора

Конструкция четырёхканального импульсного генератора и его электрическая схема приведены на Рис.1. Принцип работы генератора схож с представленными в [15–16] и основан на импульсной зарядке высоковольтного ёмкостного накопителя от низковольтного ёмкостного накопителя с помощью повышающего трансформатора.

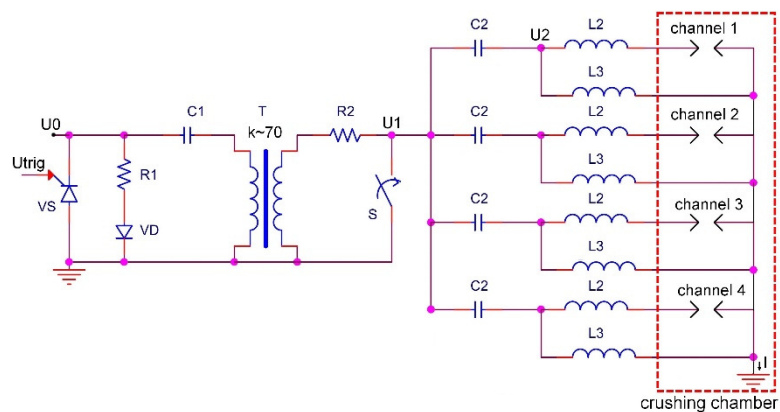
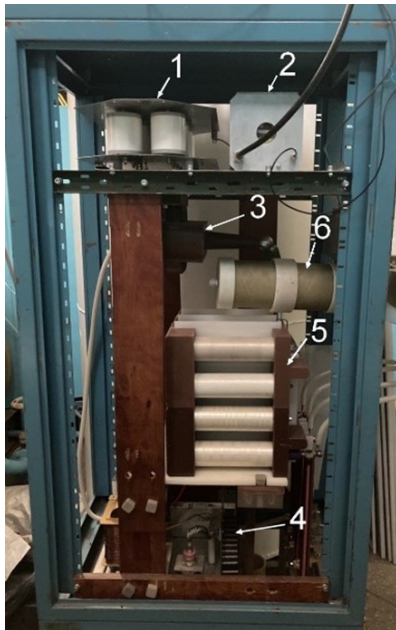


Рис.1. Конструкция и электрическая схема четырехканального генератора. 1 – низковольтный ёмкостной накопитель, 2 – тиристор, 3 – повышающий трансформатор, 4 – источник тока смещения для трансформатора, 5 – высоковольтный ёмкостной накопитель, 6 – газовый разрядник.

Генератор состоит из низковольтного блока, включающего в себя низковольтный ёмкостной накопитель  $C1$  и тиристор  $VS$ , и высоковольтного блока, включающего в себя повышающий трансформатор  $T$ , источник тока для подмагничивания сердечника трансформатора, высоковольтный ёмкостной накопитель и двухэлектродный газовый разрядник  $S$ . Низковольтный накопитель имеет ёмкость 330 мкФ и заряжается от источника постоянного напряжения до напряжения 2 кВ максимум. Трансформатор имеет коэффициент трансформации 70. Вторичная обмотка трансформатора через защитный резистор  $R2$  (~24 Ом) и зарядную индуктивность  $L3$  подключена к высоковольтному накопителю, представляющему собой параллельное соединение четырёх ветвей ёмкостью 12.5 нФ каждая. Время зарядки высоковольтного накопителя не превышает 40 мкс. При срабатывании разрядника каждая ветвь высоковольтного накопителя подключается к своему разрядному каналу в общей камере дробления. Индуктивность  $L2$  включает в себя индуктивность всех элементов разрядного контура одной ветви высоковольтного накопителя. Величина зарядного напряжения высоковольтного накопителя определяется зарядным напряжением низковольтного накопителя и напряжением срабатывания разрядника, работающего в режиме самопробоя. Стабилизация напряжения срабатывания разрядника достигается специальным коронным разрядом с электрода отрицательной полярности [17–18]. Воздух атмосферного давления используется как в качестве изоляции генератора, так и в качестве рабочей среды разрядника.

Система регистрации генератора включает в себя:

- резистивный делитель, установленный на вторичной обмотке трансформатора и измеряющий зарядное напряжение высоковольтного накопителя (напряжение в точке  $U_1$  на Рис.1);
- резистивный делитель, установленный на выходе одной ветви высоковольтного накопителя и измеряющий напряжение в точке  $U_2$  на Рис.1, который включает в себя напряжение на разрядном канале и соединительных шинах;
- резистивный шунт, установленный на общей шине земляных электродов всех каналов камеры дробления и измеряющий их суммарный ток.

### 3. Камера дробления, методы и материалы

Конструкция многоканальной камеры дробления приведена на Рис.2. Корпус камеры изготовлен из диэлектрической трубы с внешним диаметром 150 мм и внутренним 80 мм. Длина камеры вдоль оси составляет 450 мм. Использована схема с нижним расположением высоковольтных электродов. Верхние земляные электроды изготовлены из металлической трубы с внешним диаметром 32 мм. Межэлектродный зазор зафиксирован на величине 20 мм. Расстояние между соседними каналами составлял 70 мм. Камера дробления заполнялась водой с сопротивлением порядка 10 кОм·см (дистиллированной водой).

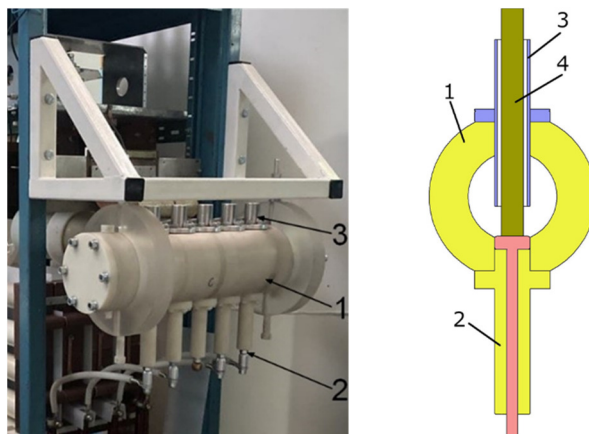


Рис.2. Фотография многоканальной камеры дробления и геометрия разрядного промежутка.  
1 – диэлектрический корпус камеры, 2 – высоковольтный электрод, 3 – земляной электрод, 4 – объект дробления. Камера имеет пять каналов, в работе использовались только четыре.

В данной работе в качестве объекта для дробления использовались образцы печатных плат на основе FR-4 с четырьмя проводящими слоями, размером 2×20 см и толщиной 1.6 мм. Дробление печатных плат с помощью ВВИ дробления является одним из самых энергозатратных по сравнению с другими материалами [8], поскольку отличаются высокой прочностью и большим содержанием металла. Образцы загружались сверху через земляные электроды и опирались на высоковольтные. Высоковольтный разряд проходил между электродами по поверхности образцов. При дроблении образцов они автоматически сдвигались вниз под собственным весом. Изменение длины образцов позволяет оценить скорость дробления образца в каждом из четырех каналов камеры дробления.

Количество импульсов в одном цикле дробления достигало 2000. Частота подачи импульсов составляла 3 Гц. После обработки полученные продукты дробления просеивались и делились на фракции: 2–5 (от 2 до 5 мм), 1–2, 0.5–1, 0.25–0.5 и менее 0.25 мм. В качестве удельных характеристик процесса дробления рассчитывались удельные энергозатраты процесса дробления на 1 г продуктов дробления ( $w$ ) и производительность процесса дробления, определяемая как потеря массы образцов за один импульс ( $m$ ).

#### 4. Исследование параметров генератора

Параметры разрядной цепи генератора сведены в Таблице 1. Величины эквивалентных индуктивности и сопротивления разрядного контура определялись по осциллограмме в режиме короткого замыкания. Импеданс разрядного контура составляет 3.4 Ом. Длительность полупериода разрядного тока около 0.5 мкс, амплитуда тока в одном канале достигает 5 кА.

Таблица 1. Параметры разрядного контура генератора

$C, \text{nF}$	$L, \text{nH}$	$R, \Omega$	$(L \cdot C)^{1/2}, \text{ns}$	$(L/C)^{1/2}, \Omega$
$12.5 \times 4 = 50$	590	0.2	170	3.4

В отсутствие образцов в камере дробления пробой разрядных промежутков не происходит, и запасённая энергия выделяется в объёмном сопротивлении воды в камере. Скорость нарастания напряжения в таком случае достигает 1 кВ/нс. Постоянная времени разряда составляет 1.5 мкс, что позволяет работать с разбросом времени пробоя промежутков до нескольких сотен наносекунд.

Типовые осциллограммы в процессе дробления печатных плат показаны на Рис.6. Здесь наблюдается комбинация «холостого хода» и «короткого замыкания». До пробоя (момент  $t_1$  на Рис.6) разрядный промежуток имеет высокое сопротивление сходное с режимом «холостой ход». После пробоя разрядный промежуток имеет низкое сопротивление сходное с режимом «короткое замыкание».

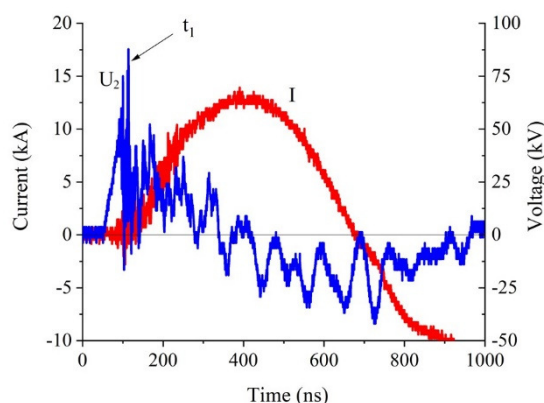


Рис.3. Осциллограмма суммарного тока всех каналов генератора в режиме короткого замыкания ( $R_{\text{LOAD}} = 0$ ). Зарядное напряжение высоковольтного накопителя 95 кВ.

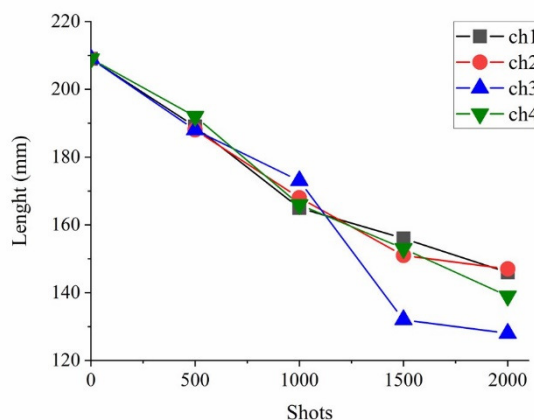


Рис.4. Зависимость длины образцов от количества поданных импульсов. Зарядное напряжение высоковольтного накопителя 95 кВ.

На Рис.4 показано изменение длины образцов в процессе дробления. Видно, что изменение длины образцов в разных каналах происходит с практически одинаковой скоростью. Это говорит о том, что данный генератор обеспечивает одновременную работу всех четырёх разрядных каналов.

#### 5. Результаты дробления печатных плат

Результаты дробления печатных плат с использованием многоканального генератора сравнивались с результатами дробления в одноканальном режиме, описанными в [14], где использовалась идентичная геометрия разрядного промежутка. В Таблице 2 показаны параметры разрядного контура многоканального генератора, приведённые к одному каналу (режим №1) а также параметры генератора в одноканальном режиме (режимы №2 и №3),

приведённые в [14]. Суммарная запасенная энергия многоканального генератора в режиме №1 имеет величину сходную с режимом №2, при этом энергия, запасенная в одной ветви многоканального генератора, имеет величину близкую к режиму №3. Параметры режима дробления, определяющие давления в искровом канале и в акустической волне, могут быть объединены безразмерным критерием подобия  $K$  [14, 19], где  $K \propto 1/(U \cdot (LC)^{1/4})$ . Величина  $K$  сравнима для всех трех режимов и составляет порядка 0.1.

**Таблица 2.** Параметры разрядного контура.  $C$  – емкость накопителя,  $U$  – зарядное напряжение,  $E$  – запасаемая энергия,  $L$  – индуктивность разрядного контура,  $R$  – сопротивление разрядного контура,  $(L \cdot C)^{1/2}$  – постоянная времени разрядного контура

	Режим	$C$ , нФ	$U$ , кВ	$E$ , Дж	$L$ , мкГн	$R$ , Ом	$(L \cdot C)^{1/2}$ , нс
№1	Многоканальный	12.5	87	47	2.4	0.8	173
№2	Одноканальный	15	150	169	1.5	2.6	150
№3	Одноканальный	8	100	40	2.1	1.5	131

Сравнение полученные удельных энергозатрат процесса дробления ( $w$ ) и производительности ( $m$ ) приведено в Таблицах 3 и 4. Данные в Таблице 3 показывают уменьшение удельных энергозатрат и увеличение производительности при переходе от одноканального режима дробления к многоканальному без изменения величины запасённой энергии. Данные в Таблице 4 демонстрируют увеличение производительностикратно количеству разрядных каналов при неизменной величине удельных энергозатрат.

**Таблица 3.** Удельные параметры процесса дробления в многоканальном и одноканальном режимах

	Режим	$E$ , Дж	$w$ , кДж/г	$m$ , мг/импульс
№1	Многоканальный	$47 \times 4 = 188$	14	14
№2	Одноканальный	169	20	8

**Таблица 4.** Удельные параметры процесса дробления в одном канале многоканального режима и одноканальном режиме

	Режим	$E$ , Дж	$w$ , кДж/г	$m$ , мг/импульс
№1	Многоканальный	47	14	$14/4 = 3.5$
№3	Одноканальный	40	12	3

Фракционный состав продуктов дробления меняется при переходе к многоканальному режиму дробления. В многоканальном режиме максимум фракционного состава смещается с фракции 1–2 мм в более мелкую фракцию, что вероятнее всего обусловлено взаимным влиянием соседних каналов [20]. В то же время количество переизмельченной фракции изменилось незначительно.

## 6. Выводы

Был разработан многоканальный высоковольтный импульсно-периодический генератор для высоковольтного импульсного дробления и других технологических применений. Импеданс разрядного контура порядка 3.4 Ом. Разрядный ток имеет амплитуду 5 кА на канал и длительность полупериода порядка 0.5 мкс. В режиме холостого хода скорость нарастания напряжения составляет 1 кВ/нс при амплитуде напряжения до 100 кВ.

Испытания генератора производились при дроблении четырехслойных печатных плат. Частота следования импульсов составляла 3 Гц. Испытания показали, что схема генератора позволяет получить одновременно четыре разрядных канала в общей камере дробления. Сравнение результатов дробления в одноканальном и многоканальном режимах демонстрирует что многоканальный режим позволяет без увеличения запасаемой энергии

получить как увеличение производительности кратно количеству каналов, так и уменьшение удельных энергозатрат процесса дробления. Кроме того, в многоканальном режиме максимум фракционного состава продуктов дробления сдвигает в более мелкую фракцию без увеличения переизмельченной фракции.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0001.

### 7. Литература

- [1] Siomkin B.V., Usov A.F., Kurets V.I., *The Principle of Electric Pulse Distraction of Materials*. (Apatity: KSC RAS 1995).
- [2] Bluhm H., Frey W., Giese H., Hoppe P., Schultheiss C., Strassner R., *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **7**, no. 5, 625, 2000; doi: 10.1109/94.879358
- [3] Andres U., *Int. J. Miner. Process.*, **97**(1–4), 31, 2010; doi: 10.1016/j.minpro.2010.07.004
- [4] Wang E., Shi F., Manlapig E., *Miner. Eng.*, **27–28**, 28, 2012; doi: 10.1016/j.mineng.2011.12.005
- [5] Yan G., et al., *Miner. Eng.*, **131**, 398, 2019; doi: 10.1016/j.mineng.2018.11.035
- [6] Mativenga P.T., Shuaib N.A., Howarth J., Pestalozzi F., Woidasky J., *CIRP Ann.*, **65**(1), 45, 2016; doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.107
- [7] Roux M., Eguémann N., Dransfeld C., Thiébaud F., Perreux D., *Thermoplast. Compos. Mater.*, **30**(3), 381, 2017; doi: 10.1177/0892705715599431
- [8] Leißner T., Hamann D., Wuschke L., Jäckel H.G., Peuker U.A., *Waste Manag.*, **74**, 123, 2018; doi: 10.1016/j.wasman.2017.12.031
- [9] Duan C.L., Diao Z.J., Zhao Y.M., Huang W., *Miner. Eng.*, **70**, 170, 2015; doi: 10.1016/j.mineng.2014.09.018
- [10] Martino R., Iseli C., Gaydardzhiev S., Streicher-Porte M., Weh A., *Chemie Ing. Tech.*, **89**(1–2), 152, 2017; doi: 10.1002/cite.201600091
- [11] Akimoto Y., Iizuka A., Shibata E., *Miner. Eng.*, **125**, 1, 2018; doi: 10.1016/j.mineng.2018.05.015
- [12] Nevala S.-M., et al., *Waste Manag.*, **87**, 43, 2019; doi: 10.1016/j.wasman.2019.01.039
- [13] Dittrich S., Thome V., Seifert S., Maier M., *Chemie Ing. Tech.*, **88**(4), 461, 2016; doi: 10.1002/cite.201500044
- [14] Zherlitsyn A. A., Alexeenko V. M., Kumpyak E. V., Kondratiev S. S., *Miner. Eng.*, **176**, 107340, 2022; doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107340
- [15] Kovalchuk B. M., Kharlov A. V., Kumpyak E. V., Sinebrykhov V. A., *J. Instrum.*, **8**, 09012, 2013; doi: 10.1088/1748-0221/8/09/P09012
- [16] Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Vizir V.A., Kumpyak V.V., Zorin V.B., Kiselev V.N., *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 103506, 2010; doi: 10.1063/1.3497307
- [17] Harrower J.A., MacGregor S.J., Tuema F.A., *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **32**(7), 790, 1999; doi: 10.1088/0022-3727/32/7/007
- [18] Kovalchuk B.M., Zherlitsyn A.A., Kumpyak E.V., *Russ. Phys. J.*, **60**(8), 1360, 2017; doi: 10.1007/s11182-017-1222-4
- [19] Krivitsky E., Shamko V., *Transient processes during high-voltage discharge in water*. (Kiev: Naukova Dumka, 1979).
- [20] Malyushevskaya A.P., Malyushevskii P.P., *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **43**(1), 59, 2007; doi: 10.3103/S1068375507010103