

**ELECTROPHYSICAL INSTALLATIONS FOR ELECTRIC-DISCHARGE
TECHNOLOGY OF CRUSHING MATERIALS**

*Andrei Alekseevich Zherlitsyn^a, Vitaly Michailovich Alexeenko,
Evgeny Valentinovich Kumpyak*

Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Academicheskyy pr. 2/3,
634055, Tomsk, Russia

^a andzh@oit.hcei.tsc.ru

ABSTRACT

Electric-discharge technology is being actively and successfully investigated as an alternative to traditional mechanical methods of crushing of rocks and composite materials. A critical element of the technology is a high-voltage pulse-periodic generator, the parameters of which have quite serious requirements: the rate of rise of a voltage pulse of the order of 10^{12} V/s at an amplitude of the order of 10^5 V, the amplitude of the discharge current of the order of 10^3 – 10^4 A, the time constant of the discharge circuit of the order of 10^{-7} – 10^{-6} s and the pulse repetition frequency of the order of 1–10 Hz. The Pulse Power Department of the IHCE SB RAS has been conducting research for many years on the development of generators for electric discharge crushing technology, using several approaches that differ in the electrical circuit. The first approach involves the use of the Marx generator. The second approach is based on pulse charging of a high-voltage capacitive storage from a primary low-voltage capacitive storage through a step-up pulse transformer and subsequent switching of the high-voltage storage using a gas switch to the load. The third approach uses a linear pulse transformer circuit. A series of generators with full automation of control has been created with an output voltage level of up to 400 kV and stored energy of more than 1 kJ, which allow varying in a wide range the amplitude of the output voltage, the energy of the electric discharge, the pulse repetition frequency. Generators are used for crushing materials, although other technological applications are possible.

KEYWORDS

Electric-discharge technology; a high-voltage pulse-periodic generators.

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ДРОБЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

*Андрей Алексеевич Жерлицын^а, Виталий Михайлович Алексеенко,
Евгений Валентинович Кумпяк*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

^а andzh@oit.hcei.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

Электроразрядная технология активно и успешно исследуется как альтернатива традиционным механическим методам разрушения горных пород и композитных материалов. Критическим элементом технологии является высоковольтный импульсно-периодический генератор, к выходным параметрам которого предъявляются достаточно серьезные требования: скорость нарастания импульса напряжения порядка 10^{12} В/с при амплитуде порядка 10^5 В, амплитуда тока разряда порядка 10^3 – 10^4 А, временная постоянная разрядного контура порядка 10^{-7} – 10^{-6} с и частота следования импульсов порядка 1–10 Гц. В отделе импульсной техники ИСЭ СО РАН в течение многих лет ведутся работы по разработке генераторов для электроразрядной технологии дробления, используя несколько подходов, различающихся электрической схемой. Первый подход связан с использованием схемы умножения напряжения Аркадьева-Маркса. Второй подход основан на импульсной зарядке высоковольтного емкостного накопителя от первичного низковольтного емкостного накопителя через повышающий импульсный трансформатор, и последующей коммутации высоковольтного накопителя с помощью газового разрядника на нагрузку. В третьем подходе используется схема линейного импульсного трансформатора. Создана серия генераторов с полной автоматизацией управления с уровнем выходного напряжения до 400 кВ и запасаемой энергии более 1 кДж, позволяющих варьировать в широком диапазоне амплитуду выходного напряжения, энергию электрического разряда, частоту следования импульсов. Генераторы используются для дробления материалов, хотя для них возможны и другие технологические применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электроразрядные технологии; высоковольтные импульсно-периодические генераторы.

Введение

Технология разрушения и дробления высоковольтными электрическими импульсами, в которой в качестве рабочего инструмента выступает канал разряда, а процесс разрушения осуществляется в водной среде (электроразрядная технология), активно и успешно исследуется как альтернатива традиционным механическим методам, а также рассматривается как экологичная альтернатива применению взрывчатых веществ. К достоинствам использования высоковольтных электрических импульсов можно отнести: высокую избирательность разрушения неоднородных структур и селективность разделения компонентов; отсутствие потребности в твердосплавном и алмазном инструменте; широкие возможности по регулированию и автоматизации процесса; возможность регулирования гранулометрического состава и получение узких заданных классов крупно-

сти; слабое загрязнение готового продукта аппаратным железом; экологическая чистота. Современные направления исследований связаны как с переработкой первичного сырья [1–3], так и вторичного сырья, а именно: волокнистых композиционных материалов [4, 5], пластиков с гальваническим покрытием [6], электронного лома [7, 8], солнечных панелей [9, 10], шлаков от сжигания отходов [11], бетона и железобетона [12] и др. Привлекательным является и комбинированное использование электроразрядного разупрочнения и традиционных механических способов разрушения [13], что открывает дополнительные возможности для повышения технологических показателей при одновременном снижении энергоемкости процессов.

Научные основы и технические средства электроразрядной технологии были разработаны еще во второй половине прошлого века. Большой вклад здесь внесли работы Томско-

го политехнического института, результаты которых систематизированы в монографиях [14, 15]. Однако ни в России, ни за рубежом производственное использование электроимпульсных установок пока еще не получило широкого распространения. Одной из причин, сдерживающих освоение электроразрядных технологий, является несовершенство электротехнического оборудования, ограниченный ресурс работы, неудовлетворительные удельные энергетические и массогабаритные характеристики элементной базы и установок в целом. Требования к параметрам импульсно-периодических генераторов достаточно серьезные и определяются характером нагрузки, в качестве которой выступает канал разряда в твердом теле или в воде. Для внедрения канала разряда в твердое тело, находящееся в жидкости, определяющим условием является высокая скорость нарастания напряжения порядка 1 кВ/нс и амплитуда напряжения на уровне несколько сот киловольт. После пробоя сопротивление плазменного канала быстро падает до единиц Ом и менее за время порядка 100 нс, в течение которого происходит передача основной доли энергии в канал разряда. Поэтому, необходимым условием эффективного вложения энергии является малое внутреннее сопротивление генератора.

В отделе импульсной техники ИСЭ СО РАН в течение многих лет ведутся исследования по разработке установок для электроразрядного дробления. Были созданы установки с энергией от 100 Дж до 8 кДж и выходным напряжением до 400 кВ, работающие в импульсно-пакетном режиме с полной автоматизацией управления [16, 17]. Около десяти установок различных версий было поставлено по контрактам в России и за рубежом. Параметры разработанных генераторов не уступают отечественным и зарубежным аналогам.

Определяющим для удельных энергетических и массогабаритных характеристик является выбор схемы формирования высо-

ковольтных импульсов. На этапе разработки основ электроразрядного разрушения материалов для генерирования высоковольтных импульсов часто использовались генераторы Аркадьева-Маркса. Такие генераторы относительно надежны, но обладают низкими удельными характеристиками. Тем не менее они остаются безальтернативными для задач, где требуется энергоемкие (порядка 10 кДж) и высоковольтные (порядка 1 МВ) генераторы. Описание установки на основе генератора Аркадьева-Маркса приводится в разделе 2. Для производственного внедрения и оптимизации электротехнического обеспечения технологии актуальна разработка альтернативных технических решений для генерирования высоковольтных импульсов, обеспечивающих существенное улучшение удельных характеристик установок. С этой точки зрения генераторы на основе трансформаторных схем во многих случаях оказываются предпочтительней генераторов Аркадьева-Маркса. В разделе 3 дано описание нескольких установок на основе импульсной зарядки высоковольтного емкостного накопителя от первичного низковольтного емкостного накопителя через повышающий импульсный трансформатор и последующей коммутации высоковольтного накопителя с помощью газового разрядника на нагрузку. Другой подход связан с использованием схемы линейного импульсного трансформатора. Его конструкция, в частности, позволяет уменьшить объем высоковольтной изоляции, упростить контроль и обслуживание конденсаторов и коммутаторов накопителя. Это схемное решение, успешно используемое в мощных электрофизических установках в режиме с однократными импульсами [18, 19], было адаптировано применительно к импульсно-периодическому режиму работы. Конструкция и результаты исследования линейного импульсного трансформатора с воздушной изоляцией, предназначенного для использования в электроразрядных технологиях, приводятся в разделе 4.

1. Установка на основе генератора Аркадьева-Маркса [17]

1.1. Схема установки и техническое описание

Электрическая схема установки приведена на рис. 1. Генератор импульсного напряжения собран по схеме Аркадьева-Маркса с восемью ступенями C_1 – C_8 . В каждой ступени генератора используется два параллельно соединенных конденсатора типа ИК1000.4 емкостью 0,4 мкФ каждый. Эквивалентная емкость генератора при срабатывании составляет 0,1 мкФ. Разрядники генератора SG_1 – SG_8 – это двухэлектродные искровые разрядники, заполненные воздухом. Напряжение срабатывания разрядников регулируется изменением давления воздуха в них. Все восемь разрядников генератора монтируются в одном корпусе из стекло-эпоксидной трубы, образуя блок разрядников. Высоковольтный источник питания осуществляет зарядку конденсаторов ступеней C_1 – C_8 постоянным током 300 мА через зарядные дроссели с индуктивностью L_1 – $L_{16} = 145$ мкГн и сопротивлением R_1 – $R_{16} = 29$ Ом. Конденсаторы генератора заряжаются до напряжения 25–50 кВ за 0,2–0,9 с со скоростью 8 кДж/с. При достижении напряжения самопробоя разрядники пробиваются и импульс напряжения

амплитудой до 400 кВ подается на высоковольтный электрод камеры дробления.

Фотография и конструкция генератора с камерой дробления показаны на рис. 2. Высоковольтный генератор размещен в маслonaполненном баке с размерами $\sim 3,12 \times 1,12 \times 0,98$ м³. К баку через проходной изолятор пристыковывается камера дробления с водяным заполнением. Объем масла в генераторе $\sim 1,5$ м³, вес генератора $\sim 2,5$ т.

1.2. Параметры генератора

Испытания генератора проводились при давлении воздуха в разрядниках 1–3 атм. Напряжение срабатывания разрядников при этих давлениях составляло от 20 кВ до 45 кВ. Использовалась как постоянная резистивная нагрузка ~ 8 Ом, так и разряд в камере дробления с разрядным промежутком 20 мм. Характерные осциллограммы напряжения и тока в камере дробления при зарядном напряжении 45 кВ и запасаемой энергии $\sim 6,5$ кДж приведены на рис. 3. В режиме дробления средняя скорость нарастания напряжения на электродах камеры составляет $\sim 1,7$ кВ/нс, амплитуда напряжения превышает 400 кВ. Пробой в камере дробления происходит с задержкой ~ 500 нс, после чего начинает протекать ток разряда с амплитудой ~ 50 кА и полупериодом $\sim 1,9$ мкс.

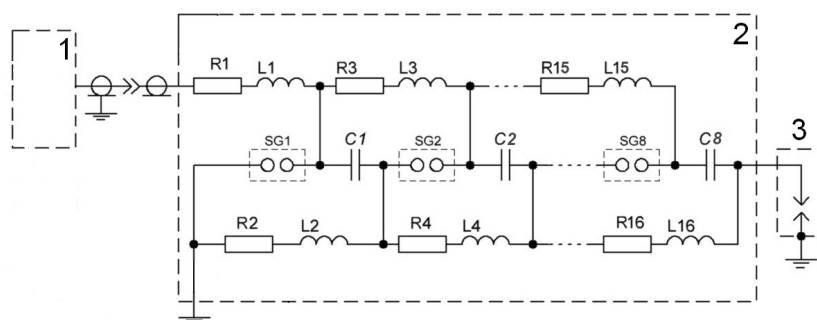


Рис. 1. Электрическая схема установки:

1 – высоковольтный зарядный источник и блок управления;
2 – генератор Аркадьева-Маркса; 3 – камера дробления

Fig. 1. Electrical circuit of the installation:

1 – high-voltage charging source and control unit;
2 – Marx generator; 3 – crushing chamber

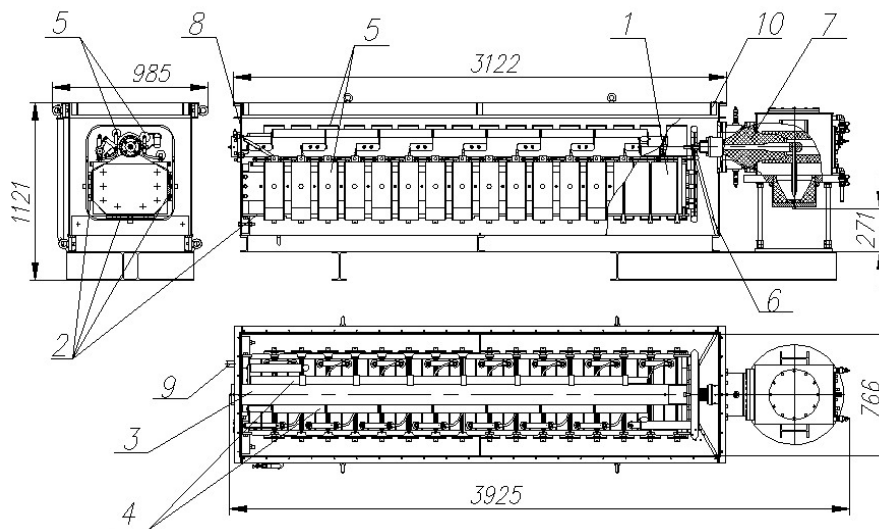


Рис. 2. Генератор с камерой дробления:

1 – конденсаторы; 2 – контейнер для конденсаторов; 3 – блок разрядников; 4 – зарядные дроссели; 5 – экраны; 6 – опорный изолятор; 7 – проходной изолятор; 8 – бак генератора; 9 – ввод зарядного напряжения; 10 – крышка

Fig. 2. Generator with a crushing chamber:

1 – capacitors; 2 – container for capacitors; 3 – block of switches; 4 – charging chokes; 5 – screens; 6 – support insulator; 7 – bushing insulator; 8 – generator tank; 9 – charging voltage input; 10 – cover

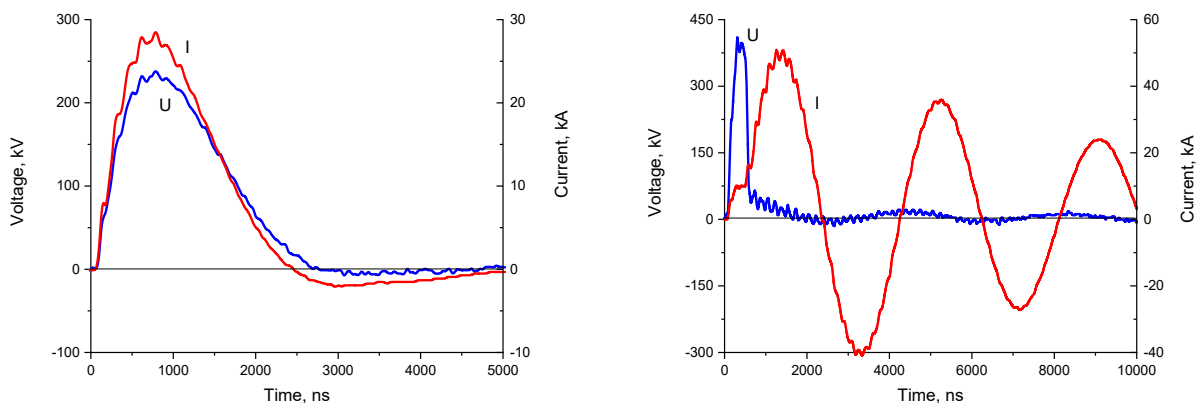


Рис. 3. Осциллограммы напряжения U и тока I в режиме работы с постоянной резистивной нагрузкой (слева) и аналогичные кривые в режиме дробления (справа) при зарядном напряжении около 45 кВ

Fig 3. Waveforms of voltage U and current I for the constant resistive load mode (left) and the crushing mode (right) at a charging voltage of about 45 kV

Параметры импульсов в режиме дробления при зарядном напряжении генератора от 20 до 45 кВ обобщены в табл. 1.

2. Установки на основе высоковольтного импульсного трансформатора

2.1. Схема и конструкция генераторов с импульсным трансформатором

Эффективность технологических генераторов определяется соотношением внутреннего сопротивления генератора и сопротивления канала разряда. С этой точки зрения генераторы с импульсным трансформатором во многих случаях оказываются предпочтительней генераторов Аркадьева-Маркса, в которых внутреннее сопротивление определяется сопротивлением последовательно включаемых коммутаторов ступеней. В генераторах на основе импульсных трансформаторов также менее остро стоит проблема с габаритами импульсных конденсаторов. Исполнение накопителя энергии в виде единого блока, а не распределенным по ступеням, как в генераторах Аркадьева-Маркса, положительно сказывается на размерах генераторов.

В ИСЭ СО РАН создана серия генераторов с выходным каскадом в виде заряжаемого до полного рабочего напряжения емкостного накопителя через повышающий импульсный трансформатор. Схема генераторов показана на рис. 4. Первичный низковольтный ем-

костной накопитель энергии C_1 заряжается от источника постоянного напряжения. Величина зарядного напряжения U_0 составляет до 2 кВ. После окончания зарядки накопитель C_1 коммутируется тиристором VS на первичную обмотку повышающего импульсного трансформатора Т. В качестве коммутатора используется тиристор ТБИ 193-2500А-30. Через защитный резистор R_2 и зарядный дроссель $L_2 \sim 0,5$ мГн происходит импульсная зарядка высоковольтного емкостного накопителя энергии C_2 за время около 100 мкс. При срабатывании газового разрядника S на разрядном промежутке в камере дробления R_{load} формируется высоковольтный импульс напряжения с фронтом менее 100 нс. Из-за наличия конструктивной емкости узла нагрузки $C_{load} \ll C_2$ напряжение на нагрузке может превышать зарядное напряжение высоковольтного емкостного накопителя энергии. Частота следования циклов импульсная зарядка – разряд накопителя C_2 может достигать 10 Гц.

Первичный емкостной накопитель энергии с коммутатором и блоком запуска, а также зарядный источник, блок размагничивания сердечника трансформатора, системы контроля, управления и защиты размещаются в отдельном экранированном шкафу. Связь между удаленным компьютером оператора и системой управления генератором осуществляется по оптоволоконным линиям.

Таблица 1. Параметры установки в режиме дробления: P – давление в разрядниках, U_0 – зарядное напряжение, E_0 – запасаемая энергия, U_{load} и I_{load} – напряжение и ток в камере дробления, t_{HV} – длительность высоковольтной фазы

Table 1. Installation parameters in the crushing mode: P is the pressure in the switches, U_0 is the charging voltage, E_0 is the stored energy, U_{load} and I_{load} are the voltage and current in the crushing chamber, t_{HV} is the duration of the high-voltage phase

P, атм / P, atm	U_0 , кВ / U_0 , kV	E_0 , кДж / E_0 , kJ	U_{load} , кВ / U_{load} , kV	I_{load} , кА / I_{load} , kA	t_{HV} , нс / t_{HV} , ns
1	20	1,3	190	17	1000
2	32	3,3	280	34	800
2,5	39	4,9	340	42	600
3	45	6,5	410	51	500

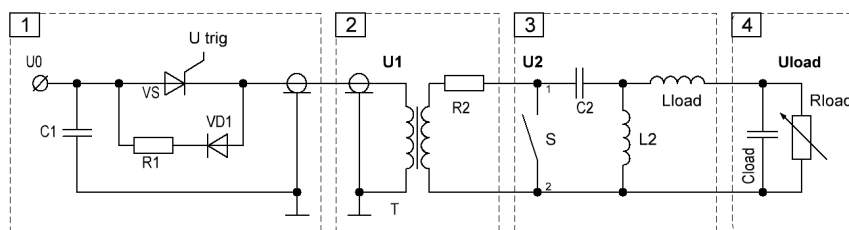


Рис. 4. Схема генератора с импульсным трансформатором:

1 – блок первичного низковольтного емкостного накопителя с тиристорным коммутатором;
2 – блок высоковольтного импульсного трансформатора; 3 – блок высоковольтного емкостного накопителя с газовым разрядником; 4 – камера дробления

Fig. 4. Scheme of a generator with a pulse transformer:

1 – block of primary low-voltage capacitive storage with a thyristor switch; 2 – block of high-voltage pulse transformer; 3 – block of high-voltage capacitive storage with a gas switch; 4 – crushing chamber

Критическими элементами генераторов являются конденсаторы емкостных накопителей энергии, импульсный трансформатор и коммутатор высоковольтного емкостного накопителя энергии. Коллектив имеет положительный опыт использования в импульсно-периодических генераторах зарубежных конденсаторов VISHAY GLI215025A либо Electronicon E53.M59472T21 для низковольтного накопителя энергии и керамических конденсаторов TDK UHV12A для высоковольтного накопителя энергии. Из отечественных конденсаторов хорошо зарекомендовали себя конденсаторы компании Элкод серии K78 для низковольтного накопителя энергии и серии K75 для высоковольтного накопителя.

Для использования в электроразрядных установках разработан импульсный трансформатор с секционированными высоковольтными обмотками с межвитковой изоляцией конденсаторного типа (рис. 5). За счет секционирования обмоток в совокупности с большой межвитковой емкостью в секции достигается выравнивание напряженности электрического поля вдоль секций и снижаются перенапряжения, возникающие при переходных процессах. Конструкция трансформатора позволяет за счет увеличения числа последовательных секций масштабировать трансформатор по выходному напряжению при сохранении напряженности электрического поля в межвитковой изоляции на уровне около 2,5 кВ/мм.

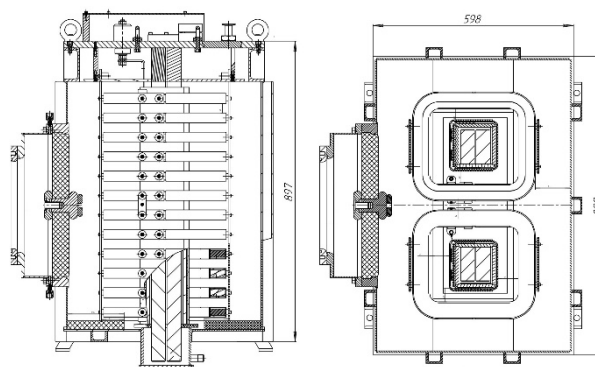


Рис. 5. Высоковольтный импульсный трансформатор с секционированными обмотками

Fig. 5. High-voltage pulse transformer with sectioned windings

В качестве коммутатора высоковольтного накопителя энергии применяется газовый разрядник высокого давления с резко неоднородным электрическим полем на электроде с отрицательным потенциалом [20]. Разрядник работает в режиме самопробоя в атмосфере сухого воздуха. Стабилизация напряжения самопробоя достигается за счет специально создаваемого коронного разряда на электроде с отрицательным потенциалом.

2.2. Установки с выходным напряжением 300 кВ

На рис. 6 приведена фотография установки с емкостью высоковольтного накопителя 9,4 нФ, выходным напряжением до 300 кВ и запасаемой энергией до ~400 Дж. Высоковольтный накопитель энергии собран в металлическом баке, заполненном трансформаторным маслом. Он заряжается через

импульсный трансформатор с коэффициентом трансформации $k \approx 155$ и разряжается на разрядный промежуток в узле дробления, где осуществляется тонкое измельчение угля в среде нефтяных остатков или воде.

Характерные осциллограммы напряжения на первичной обмотке трансформатора, напряжения высоковольтного накопителя, напряжения и тока в узле дробления при зарядном напряжении первичного накопителя 1,9 кВ приведены на рис. 7. Высоковольтный емкостной накопитель заряжается через импульсный трансформатор за время около 70 мкс до напряжения около 300 кВ. При срабатывании разрядника в узле дробления формируется импульс напряжения с фронтом около 60 нс и амплитудой ~300 кВ. После пробоя в узле дробления начинает протекать ток разряда с полупериодом около 300 нс и амплитудой первой полуволны около 20 кА.

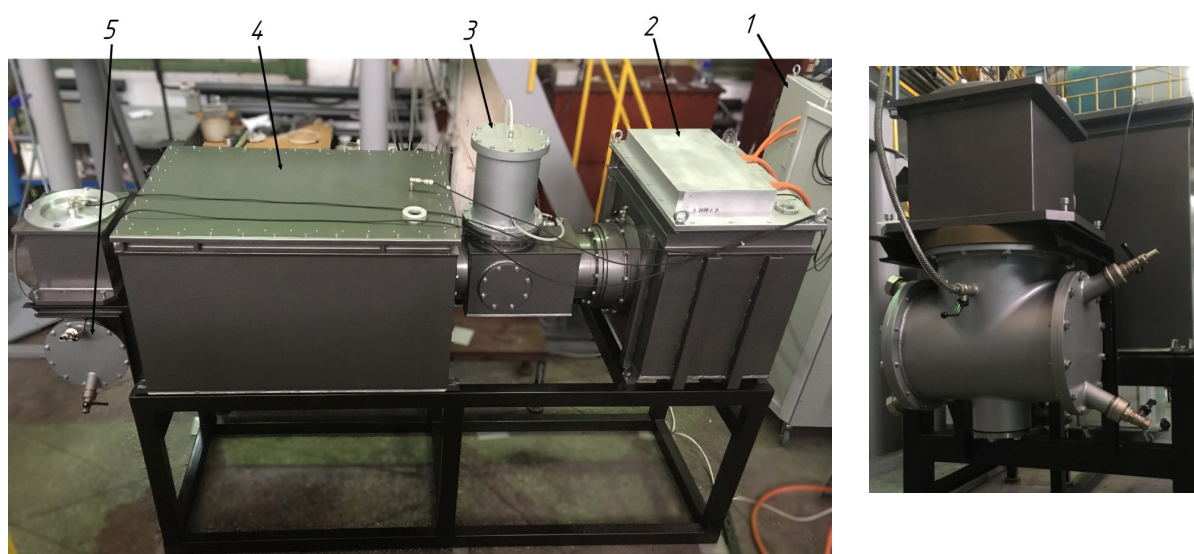


Рис. 6. Фотография установки (слева) и узел дробления (справа):
 1 – шкаф с низковольтным емкостным накопителем и системой управления;
 2 – трансформатор; 3 – газовый разрядник; 4 – блок высоковольтного емкостного накопителя,
 5 – узел дробления

Fig. 6. Photo of the installation (left) and crushing unit (right):
 1 – cabinet with low-voltage capacitive storage and control system;
 2 – transformer; 3 – gas switch; 4 – block of high-voltage capacitive storage;
 5 – crushing unit

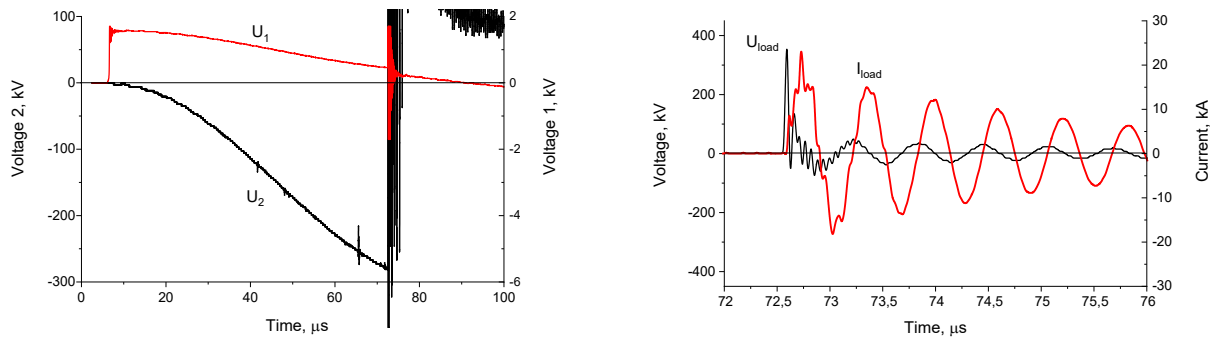


Рис. 7. Характерные осциллограммы при зарядном напряжении первичного емкостного накопителя 1,9 кВ:
 U_1 – напряжение на первичной обмотке высоковольтного импульсного трансформатора;
 U_2 – напряжение зарядки высоковольтного накопителя энергии; U_{load}
 I_{load} – напряжение и ток в узле дробления

Fig. 7. Typical waveforms at a charging voltage of the primary capacitive storage of 1.9 kV:
 U_1 is the voltage on the primary winding of the high-voltage pulse transformer;
 U_2 is the charging voltage of the high-voltage energy storage; U_{load}
 I_{load} – voltage and current in the crushing unit

Следующая установка используется для работ по дроблению кварца. Здесь используются высоковольтный накопитель емкостью 8 нФ, максимальным зарядным напряжением также до 300 кВ и запасаемой энергией до 360 Дж. Накопитель выполнен в виде двух параллельных ветвей емкостью 4 нФ, коммутируемых общим разрядником. Предусмотрена возможность подключения как одной общей нагрузки к емкостному накопителю, так и двух нагрузок к каждой ветви индивидуально. На рис. 8 показан вариант с параллельным подключением двух камер дробления. Камера дробления выполнена в виде отдельного узла без жесткой механической привязки к генератору. Электрическое соединение с высоковольтным емкостным накопителем осуществляется гибким проводником в изоляции. Такое исполнение, с одной стороны, увеличивает индуктивность разрядного контура, но, с другой – позволяет использовать генератор с различными камерами дробления в зависимости от целей исследований. В качестве рабочей среды в камере дробления используется вода.



Рис. 8. Установка с двумя параллельными камерами дробления

Fig. 8. Installation with two crushing chambers in parallel

Характерные осциллограммы разряда емкостного накопителя 8 нФ и одной ветви накопителя емкостью 4 нФ на разрядный промежуток в камере дробления показаны на рис. 9. Амплитуда тока и полупериод разряда составляют 11 кА и 430 нс для накопителя 8 нФ и 7 кА и 310 нс для накопителя 4 нФ.

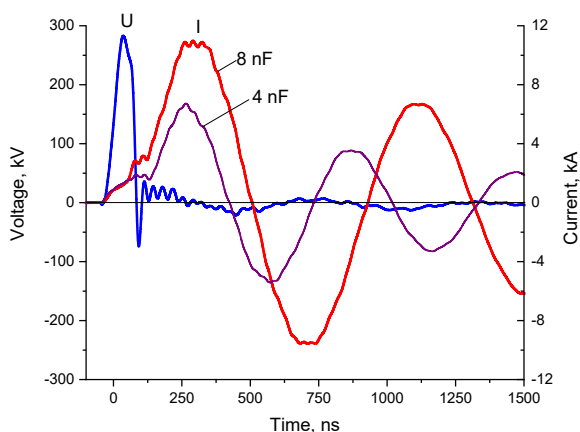


Рис. 9. Осциллограммы напряжения и тока в камере дробления при разряде емкостного накопителя 4 и 8 нФ

Fig. 9. Waveforms of voltage and current in the crushing chamber during the discharge of a capacitive storage 4 and 8 nF

2.3. Установка с выходным напряжением 400 кВ

Установка используется для исследовательских работ по разрушению железобетонных изделий, а именно железнодорожных шпал. Эффективность электроразрядного разрушения резко возрастает с увеличени-

ем расстояния между электродами [21], что и побудило увеличить выходное напряжение генератора. Создан и испытан импульсный трансформатор с секционированными высоковольтными обмотками с коэффициентом трансформации 225 и выходным напряжением свыше 400 кВ. На базе этого трансформатора создана установка с высоковольтным накопителем емкостью 15,4 нФ и запасаемой энергией до 1,2 кДж. Фотография установки дана на рис. 10. Дробление осуществляется в открытом объеме ванны, заполняемой водопроводной водой и в которую погружается разрушаемый объект.

На рис. 11 приведен пример осциллограмм импульсной зарядки высоковольтного накопителя емкостью 15,4 нФ от низковольтного накопителя емкостью 759,5 мкФ с зарядным напряжением 1,9 кВ через импульсный трансформатор до напряжения 400 кВ за время около 120 мкс. При коммутации высоковольтного накопителя на разрядном промежутке формируется импульс напряжения со скоростью нарастания более 7 кВ/нс. Амплитуда тока разряда достигает 15 кА, полупериод разряда – около 1 мкс.



Рис. 10. Установка для электроразрядного разрушения железобетонных изделий (слева) и водозаполняемый объем с разрушенной железнодорожной шпалой (справа)

Fig. 10. Installation for electric-discharge destruction of reinforced concrete products (left) and a water-filled volume with a crushed railway sleeper (right)

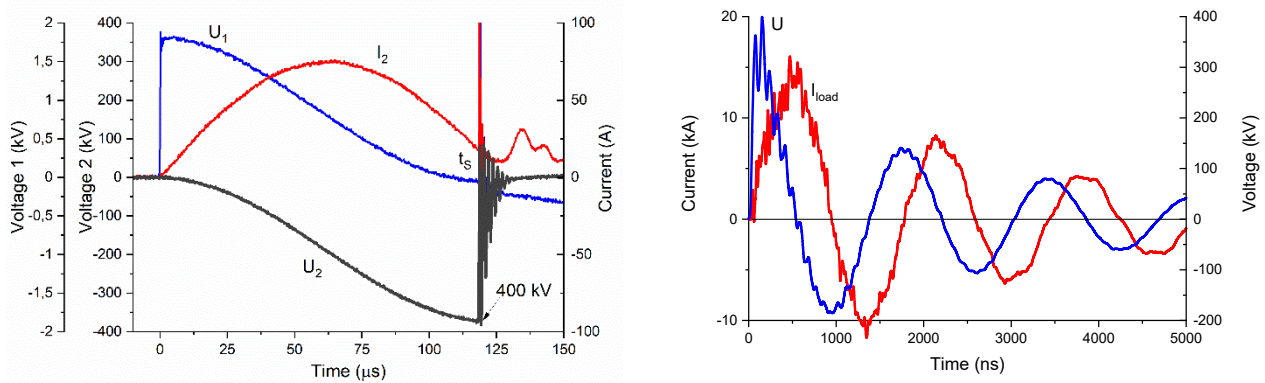


Рис. 11. Характерные осциллограммы установки с выходным напряжением 400 кВ:
 U_1 и U_2 – напряжения низковольтного и высоковольтного накопителей, I_2 – ток зарядки высоковольтного накопителя, t_s – момент срабатывания разрядника высоковольтного накопителя, U и I_{load} – напряжение и ток в узле дробления

Fig. 11. Typical oscillograms of the installation with an output voltage of 400 kV:
 U_1 and U_2 are the voltages of the low-voltage and high-voltage capacitive energy storage devices, I_2 is the charging current of the high-voltage capacitive energy storage device, t_s is the moment of operation of the high-voltage capacitive energy storage switch, U and I_{load} are the voltage and current in the crushing unit

На установке успешно выполнены исследования по электроразрядному разрушению железнодорожных шпал, которые выделяются из всего ассортимента железобетонных изделий плотной упаковкой металлической арматуры и высокой механической прочностью.

2.4. Четырехканальный генератор [22]

Для исследований электроразрядного дробления электронных отходов, а именно электронных печатных плат и солнечных панелей, создана установка с четырехканальным импульсным генератором с выходным напряжением до 100 кВ и многоканальной камерой дробления. В установке не используется трансформаторное масло. В качестве изоляции генератора и рабочей среды разрядника применяется воздух атмосферного давления. Одним из мотивов для создания установки было исследование возможности повышения производительности без увеличения энергетических затрат при переходе от одноканального к многоканальному режиму дробления [23], а также сравнение фракционного состава продуктов дробления в таких режимах.

Фотография установки дана на рис. 12. Схема генератора аналогична представленной на рис. 4. Отличие состоит в том, что высоковольтный накопитель энергии выполнен в виде четырех параллельных ветвей. Каждая ветвь накопителя коммутируется на свой канал в камере дробления общим разрядником. Емкость первичного накопителя энергии 330 мкФ, зарядное напряжение – до 2 кВ. Первичный накопитель коммутируется тиристором на первичную обмотку повышающего импульсного трансформатора с коэффициентом трансформации 70. Обмотки трансформатора выполнены на ферромагнитном сердечнике и залиты в компаунд на основе эпоксидной смолы. Через защитный резистор и зарядные дроссели происходит импульсная зарядка за время менее 40 мкс четырех ветвей высоковольтного накопителя с емкостью каждой ветви 12,5 нФ. Корпус камеры дробления выполнен из диэлектрической трубы. Используется конструкция с нижним расположением высоковольтных электродов. Камера заполняется дистиллированной водой.

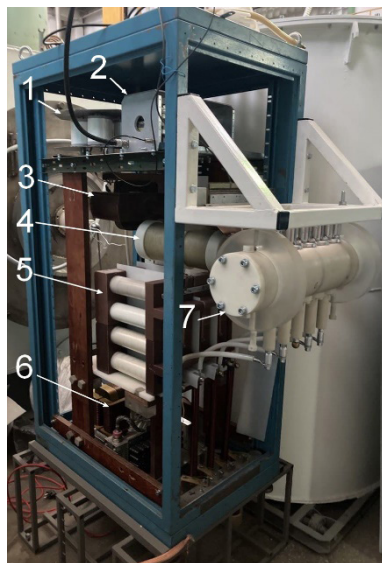


Рис. 12. Четырехканальный импульсный генератор с многоканальной камерой дробления:
 1 – блок первичного низковольтного накопителя; 2 – блок тиристорного коммутатора;
 3 – высоковольтный импульсный трансформатор; 4 – газовый разрядник; 5 – блок высоковольтного
 накопителя; 6 – источник тока подмагничивания сердечника трансформатора;
 7 – камера дробления

Fig. 12. Four-channel pulse generator with a multi-channel crushing chamber:
 1 – block of the primary low-voltage capacitive storage; 2 – thyristor switch block;
 3 – high-voltage pulse transformer; 4 – gas switch; 5 – block of high-voltage
 capacitive storage; 6 – current source of magnetization of the transformer core; 7 – crushing chamber

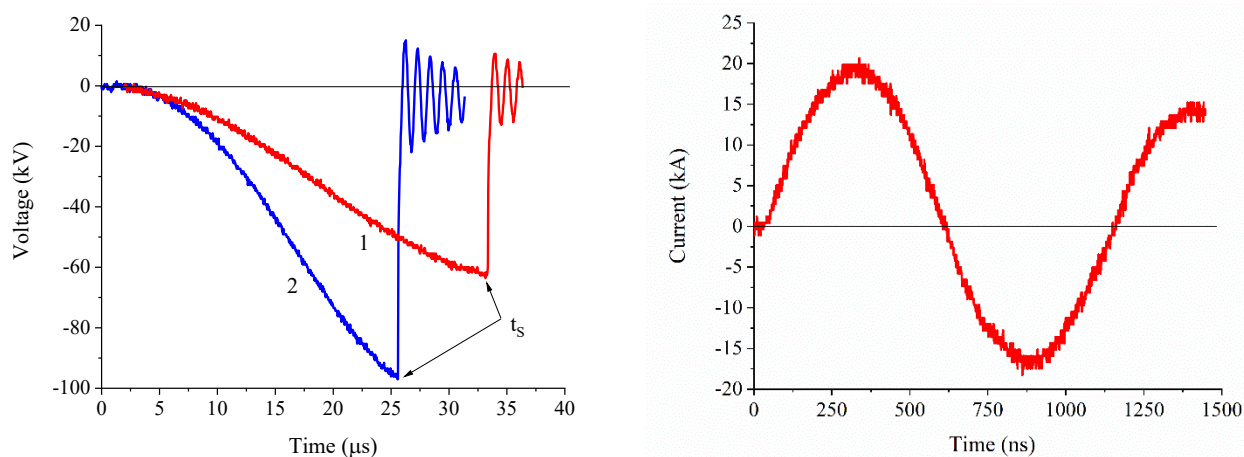


Рис. 13. Слева: Осциллограммы зарядного напряжения высоковольтного накопителя C_2 при зарядном напряжении первичного накопителя C_1 $U_0 = 0,9$ кВ (кривая 1) и $U_0 = 1,9$ кВ (кривая 2), t_s – момент срабатывания разрядника. Справа: осциллограмма суммарного тока четырех каналов генератора при зарядном напряжении высоковольтного накопителя 95 кВ

Fig. 13. Left: waveforms of the charging voltage of the high-voltage storage C_2 at the charging voltage of the primary capacitive storage C_1 $U_0 = 0.9$ kV (curve 1) and $U_0 = 1.9$ kV (curve 2), t_s is the moment of operation of the high-voltage capacitive energy storage switch. Right: waveform of the total current of the four channels of the generator at the charging voltage of the high-voltage capacitive storage of 95 kV

На рис. 13 приведены осциллограммы импульсной зарядки высоковольтного накопителя энергии и ток разряда накопителя. Параметры разрядного контура генератора обобщены в табл. 2. Волновое сопротивление разрядного контура составляет около 3,4 Ом. Генератор формирует импульс напряжения со средней скоростью нарастания 1 кВ/нс. В отсутствие пробоя разрядных промежутков временная постоянная спада напряжения составляет ~1,5 мкс, что позволяет работать при разбросе момента пробоя соседних разрядных промежутков в несколько сот наносекунд. После пробоя разрядных промежутков в камере дробления амплитуда тока в каждом канале достигает 5 кА, полупериод тока разряда составляет 0,5 мкс.

Результаты исследований дробления электронных печатных плат подтверждают возможность снижения удельных энергозатрат и увеличения производительности при переходе к многоканальному режиму. При этом также меняется фракционный состав продуктов дробления. Для многоканального режима дробления наблюдается смещение максимума распределения фракционного состава с 1–2 мм в область более мелкой фракции. При этом количество переизмельченной фракции размером менее 0,25 мм меняется незначительно.

3. Линейный импульсный трансформатор с воздушной изоляцией для электроразрядных технологий [24, 25]

К минусам рассмотренной выше трансформаторной схемы генератора можно

отнести: 1) наличие двух емкостных накопителей энергии (низковольтного и высоковольтного), стоимость которых может превышать половину от стоимости установки; 2) сложность создания импульсного трансформатора и частотного разрядника на полное напряжение порядка 100 кВ и полный ток разряда порядка 10–100 кА. Интерес представляет использование в генераторах для прикладных целей достаточно зрелой и отработанной технологии линейных импульсных трансформаторов [18, 19], лишенной обозначенных недостатков. Ранее такой подход использовался в мощных электрофизических установках в режимах с однократными импульсами. Однако для использования линейных импульсных трансформаторов в технологических целях, в частности, необходима реализация частотного режима работы с приемлемой стабильностью и ресурсом. Создан линейный импульсный трансформатор для электроразрядной технологии, отличительными особенностями которого в сравнении с трансформаторами [18, 19] являются: отсутствие жидкого диэлектрика в изоляции ступени, что позволило существенно упростить конструкцию, уменьшить габариты и улучшить эксплуатационные качества; возможность работы с частотой следования импульсов в единицы герц; размещение емкостного накопителя внутри корпуса (индуктора) и его подключение к первичному витку без использования передающих высоковольтных кабелей, что позволило уменьшить индуктивность разрядного контура.

Таблица 2. Эквивалентные емкость C , индуктивность L и сопротивление R разрядного контура генератора

Table 2. Equivalent capacitance C , inductance L and resistance R of the generator discharge circuit

C , нФ / C , nF	L , нГн / L , nH	R , Ω	$(L \cdot C)^{1/2}$, нс / $(L \cdot C)^{1/2}$, ns	$(L/C)^{1/2}$, Ω
$12,5 \times 4 = 50$	590	0,2	170	3,4

3.1. Схема и конструкция линейного импульсного трансформатора

Схема одновиткового трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 1$ показана на рис. 14, а. Емкостной накопитель энергии C подключается разрядником S к индуктору с ферромагнитным сердечником. Индуктор совместно с емкостным накопителем образуют первичный контур трансформатора. Вторичный контур образован внутренним стержневым электродом и корпусом ступени. Один конец электрода соединен с корпусом трансформатора, а другой, высоковольтный конец электрода, соединяется с нагрузкой R_{load} . При подключении емкостного накопителя к нескольким индукторам выходное напряжение увеличивается, а ток в нагрузке снижается примерно пропорционально количеству индукторов, при этом выходная мощность сохраняется. Пример трансформатора с двумя индукторами и, соответственно, с коэффициентом трансформации $k = 2$ приведен на рис. 14, б. Увеличение выходного напряжения и сохранение тока разряда достигается путем последовательно-

го включение нескольких трансформаторов на общий вторичный виток. Схема с коэффициентом трансформации $k = 4$, представляющая собой два последовательно включенных трансформатора с коэффициентом трансформации каждого $k = 2$, показана на рис. 14, в.

Фотография и конструкция трансформатора с $k = 2$ даны на рис. 15. Емкостной накопитель энергии каждого трансформатора состоит из шести высоковольтных импульсных конденсаторов К75-746, 40 кВ, 0,1 мкФ, включенных последовательно-параллельно. Эквивалентная емкость накопителя 150 нФ. Емкостной накопитель коммутируется управляемым многозазорным многоканальным газовым разрядником. Конструкция разрядника в общих чертах повторяет разрядник [26]. Индуктор трансформатора содержит сердечник из электротехнической стали ЭТ3425. Подмагничивание сердечника осуществляется от дополнительного генератора, обеспечивающего ток подмагничивания амплитудой порядка 1 кА. Размеры трансформатора с одним индуктором составляют $124 \times 39 \times 15$ см³, с двумя индукторами – $124 \times 39 \times 30$ см³.

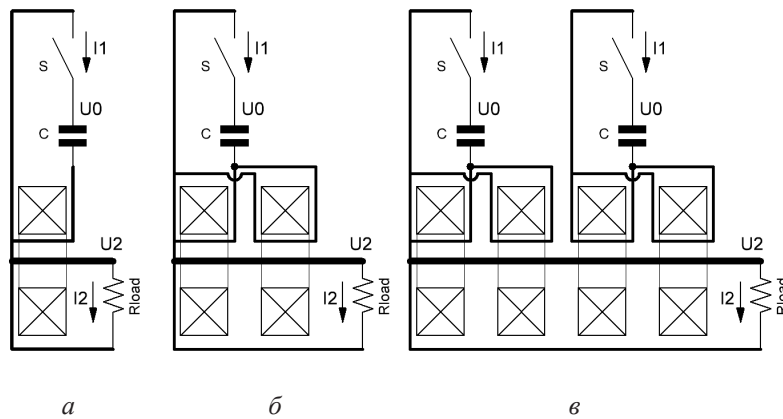


Рис. 14. Схема линейного импульсного трансформатора:

а – трансформатор с коэффициентом трансформации $k = 1$; б – трансформатор с коэффициентом трансформации $k = 2$; в – трансформатор с коэффициентом трансформации $k = 4$ (последовательное включение двух трансформаторов с коэффициентом трансформации каждого $k = 2$). U_0 – зарядное напряжение, U_2 – напряжение на нагрузке, I_1, I_2 – токи первичного и вторичного витков трансформатора

Fig. 14. Scheme of a linear pulse transformer:

а – transformer with a transformation ratio $k = 1$; б – transformer with transformation ratio $k = 2$; в – transformer with a transformation ratio $k = 4$ (series connection of two transformers with a transformation ratio of each $k = 2$). U_0 – charging voltage, U_2 – load voltage, I_1, I_2 – currents of the primary and secondary turns of the transformer

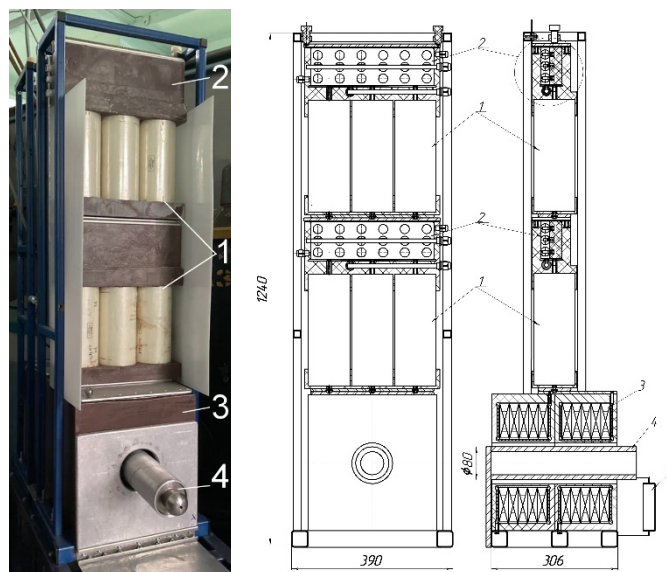


Рис. 15. Фотография и конструкция линейного импульсного трансформатора: 1 – емкостной накопитель энергии; 2 – разрядник; 3 – индуктор; 4 – электрод вторичного витка; 5 – нагрузка

Fig. 15. Photo and design of a linear pulse transformer: 1 – capacitive energy storage; 2 – switch; 3 – inductor; 4 – secondary coil electrode; 5 – load

3.2. Электрические параметры трансформатора

Электрические параметры трансформаторов с $k = 1$, $k = 2$ и $k = 4$, приведенные ко вторичному витку, сведены в табл. 3.

Работу линейного импульсного трансформатора с $k = 2$ и $k = 4$ на нелинейную нагрузку демонстрирует рис. 16. В качестве нагрузки использован разрядный промежуток в водопроводной воде. Зарядное напряжение емкостного накопителя составляло 50 кВ. До пробоя промежутка трансформатор работает в режиме холостого хода. В трансформаторе с $k = 2$ на выходе формируется импульс напряжения со скоростью нарастания

$\sim 2 \cdot 10^{12}$ В/с и амплитудой более 100 кВ. Превышение выходным напряжением величины удвоенного зарядного напряжения накопителя обусловлено наличием конструктивной емкости нагрузки (камеры с водой). Через 200 нс происходит пробой промежутка, и начинает протекать ток разряда, близкий к току короткого замыкания, с временем нарастания 400 нс и амплитудой 10 кА. При использовании трансформатора с $k = 4$ напряжение до пробоя увеличилось вдвое. После пробоя зазора амплитуда выходного тока практически не отличается для конфигураций с одним и двумя трансформаторами.

Таблица 3. Параметры разрядного контура трансформатора с $k = 1$ (А), трансформатора с $k = 2$ (В) и трансформатора с $k = 4$ (С): C_c , L_c – емкость и индуктивность разрядного контура, приведенные ко вторичному витку; $T/2$ – полупериод разряда, $\rho = (L_c/C_c)^{1/2}$ – волновое сопротивление разрядного контура

Table 3. Parameters of the discharge circuit of a transformer with $k = 1$ (A), a transformer with $k = 2$ (B) and a transformer with $k = 4$ (C): C_c , L_c are the capacitance and inductance of the discharge circuit, reduced to the secondary coil; $T/2$ is the half cycle of the discharge, $\rho = (L_c/C_c)^{1/2}$ is the impedance of the discharge circuit

Варианты схемы / Variants	C_c , нФ / C_c , nF	L_c , нГн / L_c , nH	$T/2$, нс / $T/2$, ns	ρ , Ом / ρ , Ohm
A ($k = 1$)	157,3	465	850	1,7
B ($k = 2$)	39,5	1248	660	5,6
C ($k = 4$)	19,75	2826	740	12,0

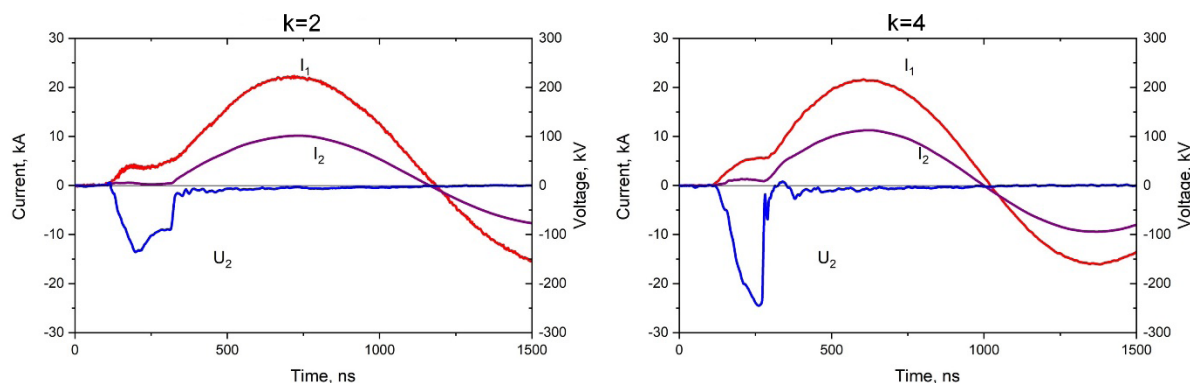


Рис. 16. Осциллограммы разряда линейного импульсного трансформатора с $k = 2$ (слева) и $k = 4$ (справа) при зарядном напряжении $U_0 = 50$ кВ на разрядный промежуток в воде: I_1 – полный ток первичного витка, I_2 – ток вторичного витка (нагрузки), U_2 – напряжение на нагрузке

Fig. 16. Waveforms of the discharge of a linear pulse transformer with $k = 2$ (left) and $k = 4$ (right) at charging voltage $U_0 = 50$ kV per discharge gap in water: I_1 – total current of the primary turn, I_2 – current of the secondary turn (load), U_2 – load voltage

3.3. Частотный режим работы

Частотный режим работы исследовался с использованием постоянной резистивной нагрузки 6 Ом для трансформатора с $k = 2$ и 9 Ом для трансформатора с $k = 4$ при зарядном напряжении 50 кВ и частоте следования импульсов до 5 Гц. Определялись время задержки срабатывания трансформатора относительно пускового импульса и амплитуда выходной мощности. Рассчитывались их средние значения в серии импульсов, а также среднеквадратичные отклонения от среднего значения. Среднеквадратичное отклонение времени задержки (джиттер) характеризует стабильность времени срабатывания, а среднеквадратичное отклонение мощности характеризует воспроизводимость выходных параметров. Выполнено более 3×10^4 срабатываний для трансформатора с $k = 2$ и более 5×10^3 для трансформатора с $k = 4$. Для трансформатора с $k = 2$ получен джиттер около 20 нс, при последовательном включении двух таких трансформаторов джиттер составил около 10 нс. Среднеквадратичное отклонение по выходной мощности составило менее 5% от среднего значения. Результаты демонстрируют успешную работу трансформатора на частоте 5 Гц.

3.4. Особенности использования линейного импульсного трансформатора в электро-разрядной технологии

Созданный генератор по схеме линейного импульсного трансформатора с воздушной изоляцией не имеет прямых аналогов. Основным его преимуществом является то, что при одинаковом энергозапасе такой генератор проще, дешевле и компактнее генераторов из раздела 3. Но необходимо учитывать ограничения, накладываемые вольт-секундным интегралом сердечника индукторов. Использование схемы линейного импульсного трансформатора целесообразно для генерации относительно коротких импульсов напряжения на нагрузке, т.е. использовать для легко пробиваемых материалов.

Заключение

Создана серия электрофизических высоковольтных импульсно-периодических установок для электро-разрядной технологии. Установки имеют автоматизированную систему управления и позволяют варьировать в широком диапазоне амплитуду выходного напряжения, энергию электрического разряда, частоту следования импульсов.

Электрофизические параметры генераторов созданных установок не уступают отечественным и зарубежным аналогам. Самая энергоемкая установка имеет энергозапас до 8 кДж при зарядном напряжении 50 кВ и выходном напряжении 400 кВ. Генератор установки построен по схеме Аркадьева-Маркса.

Для установок с энергозапасом уровня 1 кДж и ниже в большинстве случаев целесообразнее использовать генераторы на основе схемы с повышающим импульсным трансформатором. Большая часть установок создана на основе схемы с импульсной зарядкой высоковольтного накопителя через трансформатор, и последующей коммутацией высоковольтного накопителя с помощью газового разрядника на нагрузку. Самая мощная установка на основе импульсного трансформатора имеет энергозапас 1,2 кДж при выходном напряжении также 400 кВ.

Альтернативным и относительно новым подходом формирования высоковольтных импульсов применительно к электроразрядной технологии является схема линейного импульсного трансформатора с изоляцией воздухом атмосферного давления. Экспериментально апробирован такой подход при максимальном коэффициенте трансформации равном четырем и выходном напряжении 200 кВ. Результаты исследования позволяют рекомендовать использование линейного импульсного трансформатора с изоляцией воздухом атмосферного давления для технологических целей.

Созданные установки предназначены для разрушения и дробления материалов электроразрядным способом, хотя для них возможны и другие технологические применения.

Благодарности / Acknowledgments

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

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic No. FWRM-2021-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andres U. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses // *Int. J. Miner. Process.* 2010. V. 97, Iss. 1–4. P. 31–38. DOI: 10.1016/j.minpro.2010.07.004.
2. Wang E., Shi F., Manlapig E. Mineral liberation by high voltage pulses and conventional comminution with same specific energy levels // *Miner. Eng.* 2012. V. 27–28. P. 28–36. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.12.005.
3. Yan G., Zhang Z., Zhang B., Zhu G. Q., Yao H., Zhu X., Han J., Liu R., Zhao Y. Preferential sequence crushing of copper ore based upon high-voltage pulse technology // *Miner. Eng.* 2019. V. 131. P. 398–406. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.11.035.
4. Mativenga P. T., Shuaib N. A., Howarth J., Pestalozzi F., Woidasky J. High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite // *CIRP Ann. – Manuf. Technol.* 2016. V. 65, Iss. 1. P. 45–48. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.04.107.
5. Roux M., Eguemann N., Dransfeld C., Thiébaud F. Thermoplastic carbon fibre-reinforced polymer recycling with electrodynamic fragmentation // *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2017. V. 30, Iss. 3. P. 381–403. DOI: 10.1177/0892705715599431.
6. Leibner T., Hamann D., Wuschke L., Jäckel H.-G., Peuker U. A. High voltage fragmentation of composites from secondary raw materials – Potential and limitations // *Waste Manage.* 2018. V. 74. P. 123–134. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.12.031.
7. Duan C. L., Diao Z. J., Zhao Y. M., Huang W. Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards by high-voltage electrical pulses // *Miner. Eng.* 2015. V. 70. P. 170–177. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.09.018.
8. Martino R., Iseli C., Gaydardzhiev S., Streicher-Porte M., Weh A. Electro dynamic fragmentation of printed wiring boards as a preparation tool for their recycling // *Miner. Eng.* 2017. V. 107. P. 20–26. DOI: 10.1002/cite.201600091.
9. Akimoto Y., Iizuka A., Shibata E. High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels // *Miner. Eng.* 2018. V. 125. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.05.015.
10. Nevala S.-M., Hamuyuni J., Junnila T., Sirviö T., Eisert S., Wilson B. P., Serna-Guerrero R., Lundström M. Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling //

Waste Manage. 2019. V. 87. P. 43–50. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.039.

11. Dittrich S., Thome V., Seifert S., Maier M. Effective processing of municipal waste incineration slag by pulsed power technology // Chem. Ing. Tech. 2016. V. 88, Iss. 4. P. 461–468. DOI: 10.1002/cite.201500044.

12. Bluhm H., Frey W., Giese H., Hoppe P., Schultheiss C., Strassner R. Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2000. V. 7, Iss. 5. P. 625–636. DOI: 10.1109/94.879358.

13. Wang E., Shi F., Manlapig E. Pre-weakening of mineral ores by high voltage pulses // Miner. Eng. 2011. V. 24, Iss. 5. P. 455–462. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.12.011.

14. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: Кольск. науч. центр, 2002. 321 с.

15. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Апатиты: КИЦ РАН, 1995. 276 с.

16. Kovalchuk B. M., Kharlov A. V., Vizir V. A., Kumpyak V. V., Zorin V. B., Kiselev V. N. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks // Rev. Sci. Instrum. 2010. V. 81, Iss. 10. Article number 103506. DOI: 10.1063/1.3497307.

17. Kovalchuk B. M., Kharlov A. V., Kumpyak E. V., Sinebrykhov V. A. High-voltage pulsed generators for electro-discharge technologies // J. Instrum. 2013. V. 8. Article number 09012. DOI: 10.1088/1748-0221/8/09/P09012.

18. Vizir V. A., Elchaninov A. S., Zagulov F. Y. Powerful pulsed transformer // Prib. Tekh. Éksp. 1986. V. 5.

19. Luchinskii A. V., Ratakhin N. A., Fedushak V. F., Shepelev A. N. Powerful pulsed electrophysical

transformers from the Institute of High-current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences // Russ. Phys. J. 1995. V. 38, Iss. 12. P. 1246–1252. DOI: 10.1007/BF00559385.

20. Kovalchuk B. M., Zherlitsyn A. A., Kumpyak E. V. Stability of triggering of the switch with sharply non-uniform electric field at the electrode with negative potential // Russ. Phys. J. 2017. V. 60, Iss. 8. P. 1360–1366. DOI: 10.1007/s11182-017-1222-4.

21. Vazhov V. F., Gafarov R. R., Datskevich S. Yu., Zhurkov M. Yu., Muratov V. M. Electric-pulse breakdown and the breakage of granite // Tech. Phys. 2010. V. 55, Iss. 6. P. 833–838. DOI: 10.1134/S1063784210060149.

22. Alexeenko V. M., Zherlitsyn A. A., Kondratiev S. S. Multichannel high voltage pulsed generator for electrodischarge technologies // IEEE Trans. Plasma Sci. 2022. V. 50, Iss. 10. P. 3379–3383. DOI: 10.1109/TPS.2022.3172448.

23. Zherlitsyn A. A., Alexeenko V. M., Kumpyak E. V., Kondratiev S. S. Fragmentation of printed circuit boards by sub-microsecond and microsecond high-voltage pulses // Miner. Eng. 2022. V. 176. Article number 107340. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107340.

24. Zherlitsyn A. A., Alexeenko V. M., Kondratiev S. S. An air insulated linear pulse transformer for electrodischarge technology // J. Instrum. 2021. V. 16. Article number 12006. DOI: 10.1088/1748-0221/16/12/P12006.

25. Alexeenko V., Zherlitsyn A., Kondratiev S. Linear pulse transformer with pulse repetition up to 5 Hz // 2021 IEEE Pulsed Power Conference (PPC 2021), 2021. DOI: 10.1109/PPC40517.2021.9733127.

26. Zherlitsyn A. A., Kovalchuk B. M., Smorudov G. V. Capacitor units with air insulation for linear transformers // Instruments Exp. Tech. 2009. V. 52, Iss. 6. P. 802–813. DOI: 10.1134/S0020441209060098.