

**Ю. КУРАШКО**, канд. техн. наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев;  
**О. ХВОШАН**, канд. техн. наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев;  
**В. ЛИТВИНОВ**, ИИПТ НАН Украины, Николаев;  
**О. СИЗОНЕНКО**, д-р техн. наук, ИИПТ НАН Украины, Николаев

## **АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С РЕЗОНАНСНЫМ ИНВЕРТОРОМ ТОКА**

Виконано класифікацію генераторів спікання порошкових матеріалів та аналіз режимів роботи генератора з резонансним інвертором струму.

Classification of generators of powder materials sintering and analysis of the modes of operations of generator with the resonance inverting of current are performed.

**Введение.** Искро-плазменное спекание (ИПС) – метод спекания порошковых материалов под давлением, базирующийся на использовании импульсного постоянного тока с высоким значением силы тока (от единиц до десятков килоампер) для быстрого и равномерного распределения энергии плазмы между частицами [1].

Основным недостатком оборудования, выпускаемого зарубежными компаниями (SPS Syntex Inc. (Япония) [2], FCT Fine Ceramics Technologies GmbH & Co KG (Германия) [3], Thermal Technology LLC (США) [4], Easy Fashion Industry (Китай) [5]), является высокая стоимость.

**Целью** данной работы являлся общий анализ возможных электрических схем генераторов спекания порошковых материалов и выбор перспективного схемного решения.

**Общие сведения.** Общая классификация схем генераторов электроспекания порошковых материалов представлена на рис. 1.

Генератор электроимпульсного спекания (ГЭИС) предполагает достаточно простую электрическую схему подключения нагрузки. От питающей сети 220/380 В емкостный накопитель заряжается через зарядное устройство (ЗУ) до необходимого напряжения (от единиц до десятков киловольт) и через коммутатор (как правило, разрядник) подключается к нагрузке. В нагрузке выделяется затухающая серия импульсов. В ряде случаев накопитель может быть большей емкости, но заряжаться до меньшего напряжения, и через полупроводниковый коммутатор (например, тиристорный) разряжается на нагрузку через импульсный трансформатор. В данной схеме импульсный трансформатор выполняет роль согласующе-формирующего элемента.

Предполагается, что процесс спекания завершается после прохождения одной серии импульсов, поэтому данный ГЭИС может подключаться к мало-мощной питающей сети.

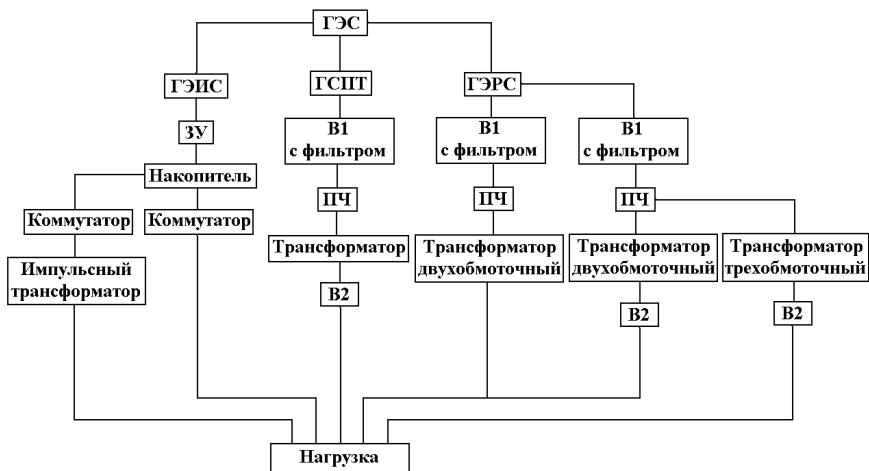


Рисунок 1 – Классификация схем генераторов спекания

Если требуется пропустить через нагрузку несколько серий импульсов, то в схеме должно быть увеличено количество емкостных накопителей, коммутаторов и устройств синхронизации их включения.

Генератор спекания постоянного тока (ГСПТ), обеспечивающего режим спекания «сопротивлением», в зависимости от своего функционального назначения должен подключаться к мощной трехфазной сети, обеспечивающей выходную мощность от десятков до сотен киловатт.

Непосредственно к трехфазной сети подключен неуправляемый либо управляемый выпрямитель, собранный по шестипульсационной схеме выпрямления. Трехфазная сеть 380 В, 50 Гц обеспечивает выпрямленное напряжение 500 В. При управляемом выпрямителе (с фазовой системой регулирования угла открывания тиристоров выпрямителя) выпрямленное напряжение можно изменять в пределах 300 В (с существенным увеличением пульсации выпрямленного напряжения). При глубоком регулировании выпрямленного напряжения требуется более мощный фильтр. Далее напряжение поступает на элемент схемы (например, преобразователь повышенной частоты (ПЧ) с широтно-импульсным регулированием (ШИР)), который позволяет изменять напряжение (и, соответственно, мощность), подаваемое на трансформатор. понижающий трансформатор, рассчитанный на полную мощность и работающий на высокой частоте (вследствие чего массогабаритные показатели могут быть вполне приемлемыми), подключен через низковольтный силовоточный выпрямитель к нагрузке.

Таким образом, в данной схеме за счет управляемого выпрямителя (В1) и преобразователя (ПЧ с ШИР) возможно регулирование мощности в нагрузке в широких пределах (практически от нулевой до номинальной).

Генератор электроразрядного спекания (ГЭРС), иначе называемый гене-

ратором импульсно-плазменного спекания или SPS в иностранных источниках, представляет собой в классическом исполнении два источника постоянно-го и переменного напряжения, работающие на общую нагрузку (Н).

Один из источников содержит трехфазный сетевой выпрямитель В1 с фильтром (может быть неуправляемым), постоянное напряжение которого поступает на вход преобразователя частоты ПЧ с ШИР, далее на двух- либо трехобмоточный трансформатор, осуществляющий согласование сопротивления нагрузки с сопротивлением сетевого источника, и выпрямитель В2 (низковольтный, высокоточный), подключаемый к нагрузке. Второй источник имеет аналогичную электрическую схему соединения элементов при отсутствии выпрямителя В2 (на нагрузку подается переменное напряжение).

ГЭРС и ГЭИС по своей природе воздействия на порошок очень близки, но при этом все положительные и отрицательные технологические аспекты более ярко выражены в технологии ГЭИС, поскольку сам процесс занимает значительно меньшее время.

**Анализ режимов работы генератора.** Возможным вариантом построения генератора импульсно-плазменного спекания порошковых материалов является использование схемы с резонансным автономным последовательным инвертором тока. Преимуществом данной схемы является малая зависимость мощности, выделяемой в нагрузке, от изменения ее сопротивления в процессе спекания, а также возможность переключения ключей инвертора в нулевые моменты тока, что позволяет снизить потери в полупроводниковых элементах, улучшить условия их переключения. Одним из вариантов схемы является использование мостовой схемы инвертора, выполненного на транзисторах (рис. 2), позволяющей гибко регулировать протекающий в нагрузке ток, управляя полупроводниковыми ключами.

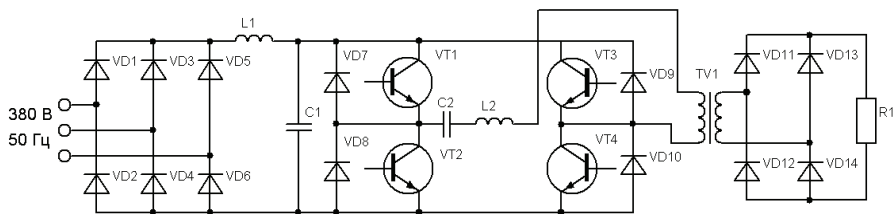


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема генератора спекания с инвертором, выполненным на транзисторах по мостовой схеме

Для уменьшения габаритных размеров трансформатора TV1 и элементов C2, L2 контура была выбрана промежуточная частота преобразования энергии  $f = 5$  кГц. При этом частота переключения транзисторов VT1-VT4 принималась удвоенной. Согласующий трансформатор TV1 позволил выбирать сопротивление нагрузки R1 (спекаемого образца) таким образом, чтобы при его уменьшении в четыре раза (от начала до конца спекания) выделяемая в на-

грузке мощность оставалась неизменной в пределах 11-12 кВт. Входной фильтр L1, C1, с одной стороны, уменьшает уровень высших гармоник в напряжении, поступающем на инвертор, с другой стороны – емкость C1 образует часть контура, по которому протекает высокочастотный ток транзисторов VT1-VT4 и ток диодов VD7-VD10 при закрытых транзисторах. Элементы фильтра выбирались из условия  $L1 \approx 10 \cdot L2$ ;  $C1 \approx 10 \cdot C2$ .

Для определения формы кривой напряжения в нагрузке в течение времени спекания и необходимой величины элементов схемы, обеспечивающих требуемую мощность, был проведен анализ переходных процессов в цепи. Расчеты были проведены с помощью компьютерного анализа в программе PSpice, входящей в пакет OrCAD 16.0.

Трансформатор принимался идеальным, сопротивление R1 приводилось к первичной обмотке.

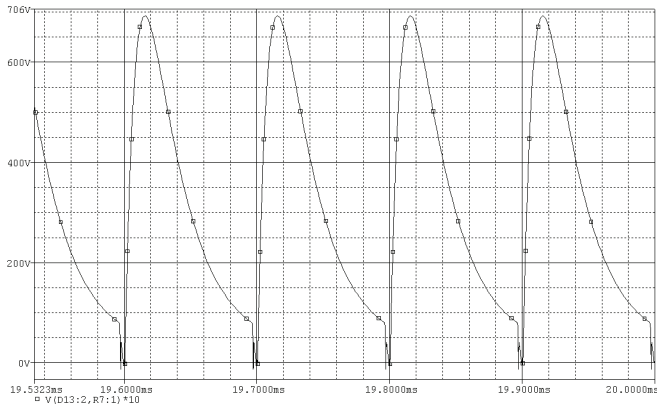
Результаты расчетов приведены на нижеследующих рисунках.

Зависимость изменения потребляемой нагрузкой мощности от приведенного сопротивления изображена на рис. 3. При параметрах цепи  $C2 = 2,8 \text{ мкФ}$ ;  $L2 = 95 \text{ мкГн}$  приведенное сопротивление нагрузки в процессе спекания изменяется от 14 до 3,5 Ом. При этом мощность на начальном и конечном этапах процесса находится в пределах 10,5 – 11 кВт, в течение процесса возрастая до 13,5 – 14 кВт.

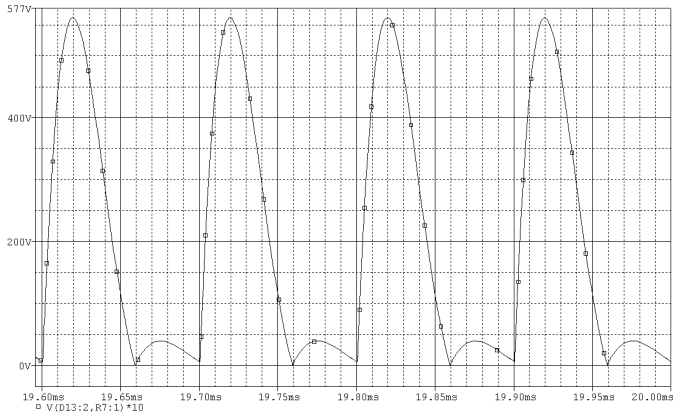


Рисунок 3 – Зависимость изменения потребляемой нагрузкой мощности от ее приведенного сопротивления

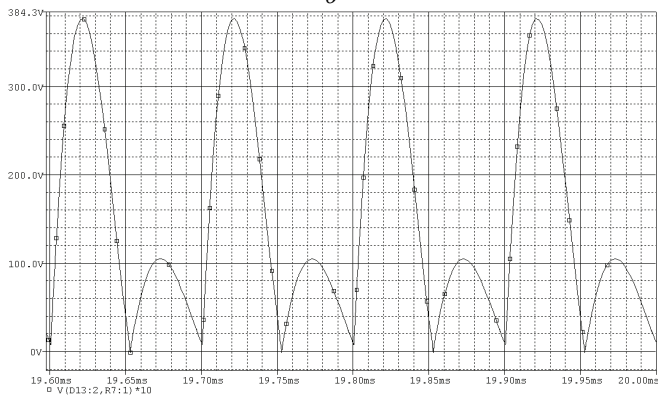
Осциллограммы напряжения в нагрузке в начальный, конечный момент времени и при выделении в ней наибольшей мощности приведены на рис. 4.



*a*



*б*



*в*

Рисунок 4 – Осциллограммы напряжения в нагрузке в начальный (а), конечный (в) момент времени и при выделении в ней наибольшей мощности (б)

В различные моменты времени протекания процесса спекания выделяют следующие режимы:

- 1)  $R_1 > 2\sqrt{L_2/C_2}$  – начальный момент времени, характеризуется экспоненциальным падением напряжения на нагрузке;
- 2)  $R_1 = 2\sqrt{L_2/C_2}$  – критический режим, переход от экспоненциально падающего к затухающему периодическому напряжению на нагрузке;
- 3)  $R_1 < 2\sqrt{L_2/C_2}$  – конечный момент времени процесса спекания, затухающий периодический характер напряжения на нагрузке;
- 4)  $R_1 = \sqrt{L_2/C_2}$  – режим выделения наибольшей мощности в нагрузке.

Важную роль в процессе спекания играют переменная и постоянная составляющие в кривой напряжения на нагрузке. Распределение постоянного и действующего напряжения первой гармоники (5 кГц) при разложении в ряд Фурье представлено в таблице. Как видно из таблицы, в процессе спекания доля переменной составляющей относительно постоянной вначале возрастает, затем убывает. Всплеск потребляемой мощности можно уменьшить, перейдя к режиму выделения в нагрузке постоянной мощности при широтно-импульсной модуляции напряжения в преобразователе частоты.

Режим	Постоянное напряжение, В	Переменное напряжение (5 кГц), В	Мощность в нагрузке, кВт
Начало спекания	330	260	10,8
Выделение наибольшей мощности	200	260	13,8
Конец спекания	155	140	10,8

## Выводы

1. Использование резонансного автономного последовательного инвертора тока в генераторе импульсно-плазменного спекания дает возможность гибкого регулирования соотношения постоянной и переменной составляющих тока, протекающего через спекаемый образец.
2. Результаты расчетов позволяют перейти к проектированию элементов генератора спекания мощностью до 10 кВт.

**Список литературы:** 1. Tokita M. Mechanism of Spark Plasma Sintering / M. Tokita // Proceedings of the International Symposium on Microwave, Plasma and Thermochemical Processing of Advanced Materials. – Joining and Welding Research Institute, Osaka University, 1997. – P. 69-76. 2. Сайт компании SPS Syntex Inc. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scm-sps.com>. 3. Сайт компании FCT Fine Ceramics Technologies GmbH & Co KG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fct-systeme.de>. 4. Сайт компании Thermal Technology LLC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thermaltechnologyinc.com>. 5. Сайт компании Easy Fashion Industry [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://efmpt.com>.

Поступила в редколлегию 08.04.2011.