

# ВЗРЫВОМАГНИТНЫЙ ГЕНЕРАТОР С ВНУТРЕННИМИ УСТРОЙСТВАМИ ФОРМИРОВАНИЯ ТОКА ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ИНЖЕКТОРОВ

## MAGNETO CUMULATIVE GENERATOR WITH INTERNAL CURRENT FORMATION DEVICES FOR PULSED PLASMA INJECTORS

*А. В. Шурупов, В. Е. Завалова, А. В. Козлов, М. А. Шурупов,  
А. М. Житлухин, В. П. Бахтин, Н. М. Умрихин*

*A. V. Shurupov, V. E. Zavalova, A. V. Kozlov, M. A. Shurupov,  
A. M. Zhitluhin, V. P. Bahtin, N. M. Umrihin*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва,  
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow

Применительно для импульсных плазменных инжекторов предлагается источник тока на основе взрывомагнитного генератора (ВМГ) спирального типа с видеоизмененным законом вывода индуктивности для растущей нагрузки. Разработанная конструкция ВМГ позволяет в широких пределах регулировать форму импульса тока существенно переменной нагрузке и оптимизировать работу источника питания под конкретную плазменную нагрузку. Ключевыми регулируемыми параметрами являются: ток, передаваемый в нагрузку; остаточная индуктивность ВМГ; время выборки указанной индуктивности и конечный ток в нагрузке. Экспериментально продемонстрирована принципиальная возможность применения разработки источников на основе предложенной конструкции для работы с плазменными инжекторами в мегаджоульном диапазоне энергий как на один ускоритель (инжектор), так и на два, включенных параллельно.

The current source based on a helical explosive-magnetic generator (EMG) with a modified output inductance law for the growth load is proposed for the impulse plasma injectors. The developed design of the EMG allows a wide variation in the shape of the current pulse in an essentially variable load and optimizes the operation of the power source for the specific plasma load. The key adjustable parameters are: the current transferred to the load; residual inductance of the EMG; the sampling time of the inductance and the final current in the load. The principal possibility of using the development of sources on the basis of the proposed design for working with plasma accelerators in the MJ energy range is demonstrated experimentally as for one accelerator (injector) and two connected in parallel.

### Введение

Исследования и моделирование работы импульсных плазменных нагрузок различного типа является предметом интереса многих разделов физики. В число широко распространенных задач входят – импульсные плазменные ускорители (ИПУ); плазменный фокус; моделирование и исследование динамики плазменных струй в ионосфере; сильноточные плазменные прерыватели; генерация рентгеновского излучения, исследования эрозии металлических образцов при воздействии интенсивных потоков плазмы, создаваемых ИПУ, [1–4]. Все указанные направления предъяв-

ляют особые требования к источнику импульсного тока (энергии) для формирования плазменного потока с необходимыми параметрами.

Традиционно, в качестве источников энергии, используются емкостные накопители. Они очень практичны в использовании, но обладают падающей мощностью в нагрузке, что отрицательно влияет на режим согласования работы источника питания с плазменной нагрузкой. Это подтверждено многочисленными опытами, в том числе и в наших исследованиях [5]. В качестве альтернативы емкостным накопителям, в данной работе предлагается применить ВМГ, со специальными устройствами формирования импульса тока. Оп-

тимизированная под конкретную нагрузку конструкция ВМГ позволяет избежать преждевременного падения амплитуды тока, от которой существенно зависит КПД плазменных нагрузок. В статье приведены сравнительные осциллограммы токов и напряжений для двух типов источников при работе на ИПУ. Показана эффективность работы разработанного взрывомагнитного генератора для питания ИПУ. Проведена серия экспериментов по управлению формой выходного импульса тока ВМГ и согласованию последнего с работой конкретной плазменной нагрузки. Более подробно с принципом работы ВМГ можно ознакомиться в книгах [6, 7]. В данной статье мы остановимся на задачах, связанных с работой ВМГ на ИПУ. С электротехнической точки зрения ИПУ является нелинейной нагрузкой для ВМГ, обладающей растущей индуктивностью в процессе работы, что характерно для широкого класса плазменных нагрузок.

### Постановка задачи

Электротехническая схема ВМГ с нагрузкой, в виде двух ИПУ, включенных параллельно, представлена на рис. 1. Принцип работы использованных типов ускорителей изложен в [8]. Во время работы ускорителя происходит нелинейный рост индуктивности нагрузки, существенно зависящий от тока. При питании от батареи, резкое увеличение индуктивности приводит к заметному падению тока и наличию «особенности» на осциллограммах тока и напряжения (рис. 3), отличающих режим работы от синусоидального разряда батареи на постоянную нагрузку. Одним из основных параметров, определяющих эффективность работы

подобных систем, является максимально достижимая амплитуда тока до появления указанной особенности, после которой ток в системе падает.

Для поддержания роста тока необходимо постоянно нагнетать магнитный поток в нагрузку все большими темпами, что требует растущего напряжения и мощности источника питания. Очевидно, что емкостный накопитель не обладает указанной характеристикой. Для решения этой задачи был разработан взрывомагнитный генератор (ВМГ) со специальным устройством формирования токового импульса. Общий вид конструкции указанного ВМГ представлен на рис. 2.

Разработанный вариант ВМГ представляет собой классический спиральный генератор, совмещенный в одной конструкции с двумя коммутаторами. Принцип действия разработанной конструкции следующий: в первой фазе работы устройства производится запитка спирали ВМГ (3) начальным магнитным потоком; после этого производится подрыв основного заряда лайнера, и ВМГ большую часть времени работает на взрывной размыкателе (5) в короткозамкнутом режиме, преобразуя энергию ВВ в электрическую; на следующем этапе работы происходит подключение нагрузки параллельно к цепи размыкателя, посредством твердотельного замыкателя (4); после подключения нагрузки, с задержкой, регулируемой внутренними средствами ВМГ, обеспечивается срабатывание взрывного размыкателя (5), переключающего основной ток в нагрузку; завершающей стадией работы описываемой конструкции является выборка остаточной индуктивности ВМГ, которая на момент срабатывания взрывного размыкателя составляет от 50 до 500 нГн, в зависимости от выбранного режима синхронизации.

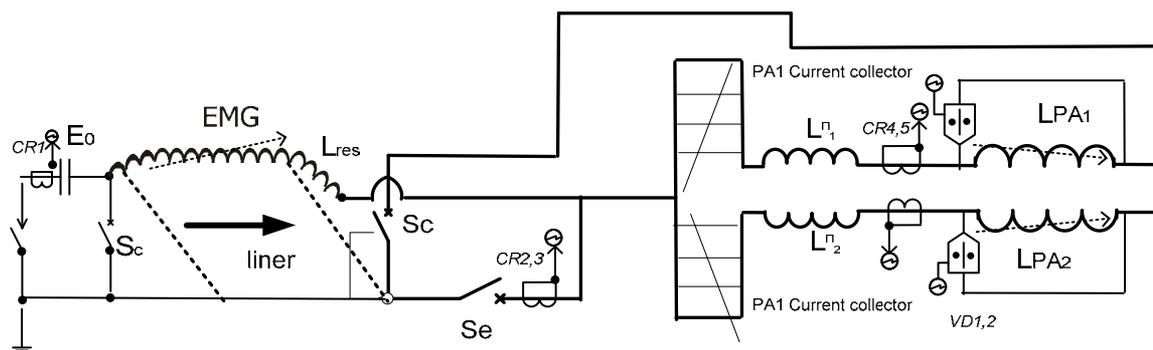
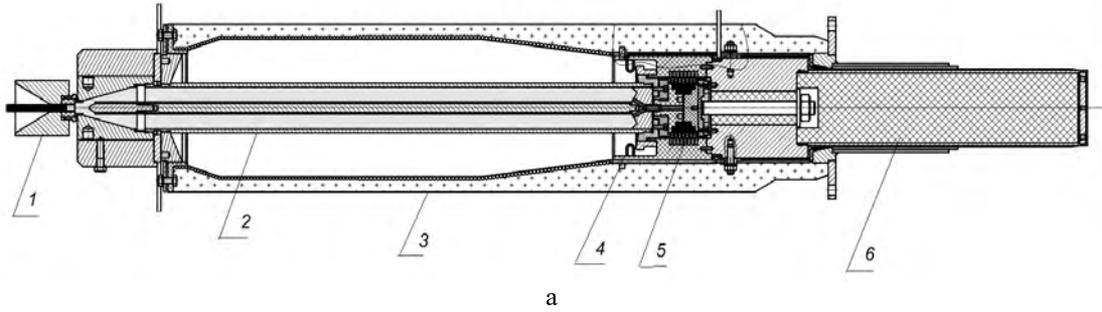


Рис. 1. Принципиальная схема соединения источника импульсного тока – ВМГ с нагрузкой в виде ИПУ. Все нагрузки подключаются параллельно через токосборник. На данном рисунке представлено два ИПУ. LPA1 и LPA2 – индуктивности ИПУ1 и ИПУ2 соответственно, E0 – источник начальной энергии, Sc – замыкатель, Se – взрывной размыкатель, CR1,5 – пояса Роговского, VD – делители напряжения



а

Рис. 2. а) Общий вид ВМГ. 1 – блок инициатора, 2 – лайнер, 3 – спираль ВМГ, 4 – замыкатель  $S_c$ , 5 – взрывной размыкатель –  $S_c$ , 6 – токовывод. в) фото ВМГ

Ключевым аспектом описанной концепции работы ВМГ является растущая мощность при работе на нагрузку в завершающей стадии, которая обеспечивается постоянно увеличивающейся производной индуктивности  $dL/dt$ . Кроме того, важно отметить значительную гибкость представленной конструкции, т. к. она обладает множеством регулируемых параметров. К таким параметрам относятся: моменты подключения нагрузки и срабатывания взрывного размыкателя, остаточная индуктивность и время выборки последней. Общая временная диаграмма работы ВМГ определяется скоростью расширения лайнера, которая регулируется типом использованного ВВ и геометрией лайнера. Момент подключения нагрузки определяется положением замыкателя, а момент срабатывания взрывного размыкателя – собственным временем срабатывания и детонационной линией задержки между основным зарядом ВВ и зарядом в размыкателе. Время перестройки индуктивности ВМГ на последней стадии работы регулируется согласованием угла наклона спирали последней секции ВМГ с углом раскрытия лайнера и его скоростью. Подрыв ВМГ осуществляется от одного детонатора и не требует дополнительных линий подрыва для синхронизации коммутирующих устройств. Описанная вариативность параметров ВМГ позволяет оптимизировать его работу для широкого круга нелинейных плазменных нагрузок. Разработанная конструкция ВМГ снабжена специальным коаксиальным токовым выводом энергии, что позволяет применять его во взрывных защитных камерах, при этом нагрузка располагается вне камеры и может быть полностью сохраненной.

Принципиальным моментом при разработке конструкции ВМГ была необходимость удержать массу заряда внутри лайнера в пределах 5–6 кг,

т. к. для проведения экспериментов в лабораторных условиях использовалась взрывная камера «Титан» с максимальной разрешенной массой до 8 кг. В проведенной предварительной серии экспериментов использовались лайнеры диаметрами от 90 до 95 мм с зарядами ВВ из насыпного гексогена. Также было использовано два типа основной спирали ВМГ. В первых пусках для отработки конструкции использовались менее мощные ВМГ со спиралью диаметром 200 мм. После апробации разработанной конструкции на маломощных генераторах был осуществлен переход на более мощные ВМГ с диаметром спирали 300 мм. Используемые типы зарядов обеспечили поперечные скорости разлета лайнера от 1 до 1,3 км/с, что соответствует углу раскрытия от 7 до 9 градусов. Указанные скорости позволили достичь времен выборки остаточной индуктивности ВМГ на уровне 10–18 мкс. Еще одним преимуществом применения ВМГ является конструктивная возможность минимизировать паразитную индуктивность между источником тока и нагрузкой.

## Результаты

На рис. 3 показана характерная осциллограмма тока и напряжения при работе ИПУ от конденсаторной батареи (1 мФ, 25 кВ). Напряжение измеряется при помощи делителя на входном коллекторе нагрузки, ток измерялся поясом Роговского, встроенным в коммутирующий разрядник. Как видно из представленной осциллограммы, при достижении током значения порядка 1,5–2 МА индуктивность нагрузки начинает резко увеличиваться, что приводит к существенному росту напряжения до 20 кВ и более. К этому моменту на конденсаторной батарее остается напряжение, не превышающее 10 кВ. Очевидно, что ос-

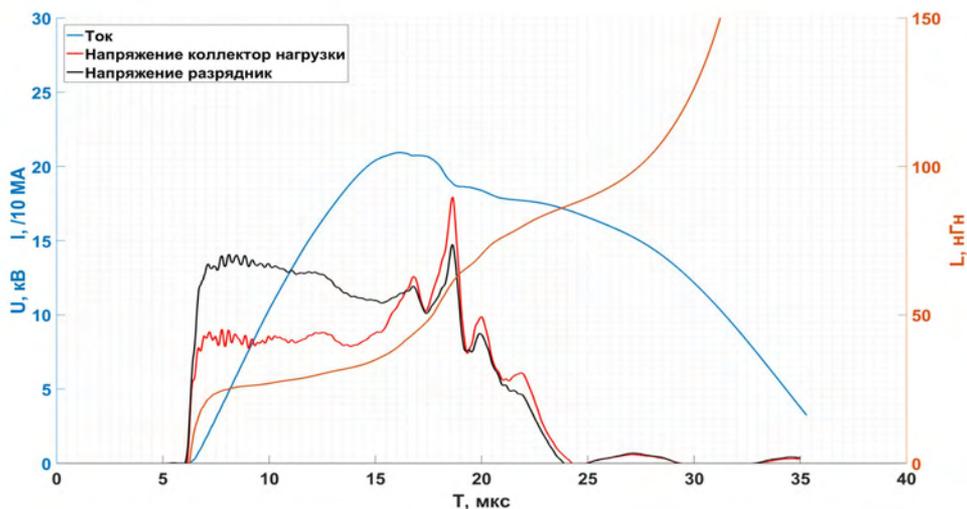


Рис. 3. Характерная осциллограмма работы ИПУ от конденсаторной батареи

таточное напряжение батареи не в состоянии обеспечить разрядный контур магнитным потоком, необходимым для поддержания тока. Результатом описанной ситуации является резкое падение амплитуды тока при перестройке нагрузки и отклонение осциллограммы тока от синусоидальной формы. Фактически задача экспериментаторов в описанной схеме работы нагрузки сводится к достижению максимальной величины тока до начала резкого роста индуктивности системы, после которого паразитная индуктивность контура работает как накопитель энергии. Заметно увеличить или даже поддержать ток в системе с конденсаторной батареей после указанного момента не представляется возможным.

Применение ВМГ для запитки рассматриваемой нагрузки позволило существенно увеличить мощность источника питания при заметном уменьшении габаритов последнего. В ходе экспериментальной серии было отработано два основных режима работы ВМГ на ИПУ, отличающихся в первую очередь синхронизацией коммутирующих узлов ВМГ.

Первый режим характеризуется более поздним срабатыванием взрывного размыкателя по отношению к замыкателю и выборке основной индуктивности ВМГ. В данном режиме синхронизации переключение тока в нагрузку происходит при достаточно большом токе  $>2$  МА и практически отсутствует остаточная индуктивность ВМГ после переключения. В описанном режиме перестройка остаточной индуктивности слабо увеличивает ток в нагрузке после переключения. Фактически этот режим повторяет задачу быстрого

разгона тока в системе, по аналогии с конденсаторной батареей, однако существенно увеличивает производную тока в нагрузке. Время переключения тока в проведенных экспериментах составило 3–4 мкс при максимальной амплитуде тока в нагрузке  $\sim 2,5$  МА. Для сравнения, от конденсаторной батареи ток увеличивается до 1,8–1,9 МА примерно за 10 мкс. Заметную роль в увеличении производной тока в нагрузке играет существенное уменьшение паразитной индуктивности системы. В системе с конденсаторной батареей паразитная индуктивность ошиновки и коммутирующего разрядника находится на уровне 35–40 нГн, в то время как при питании от ВМГ удается удержать пассивную индуктивность на уровне 15–20 нГн.

Вторым режимом работы ВМГ разработанной конструкции, является режим с явным вытеснением остаточного магнитного потока в нагрузку после переключения тока в нагрузку. В таком режиме работы существенно снижается нагрузка на взрывной размыкатель ввиду того, что переключение происходит при токе  $\sim 1$ –1,5 МА. После переключения остаточная индуктивность ВМГ остается значительной (порядка 180–200 нГн) и ее выборка занимает 5–6 мкс. При этом существует возможность согласовать процесс перекачки остаточного магнитного потока в нагрузку с динамикой увеличения индуктивности последней.

На рис. 4 показаны осциллограммы импульсов тока и напряжения при работе ВМГ два инжектора, включенных параллельно. Измерение напряжения производилось на токоборниках каждого из ИПУ. Проведение серии экспериментов позволило последовательно подобрать наилучший режим со-

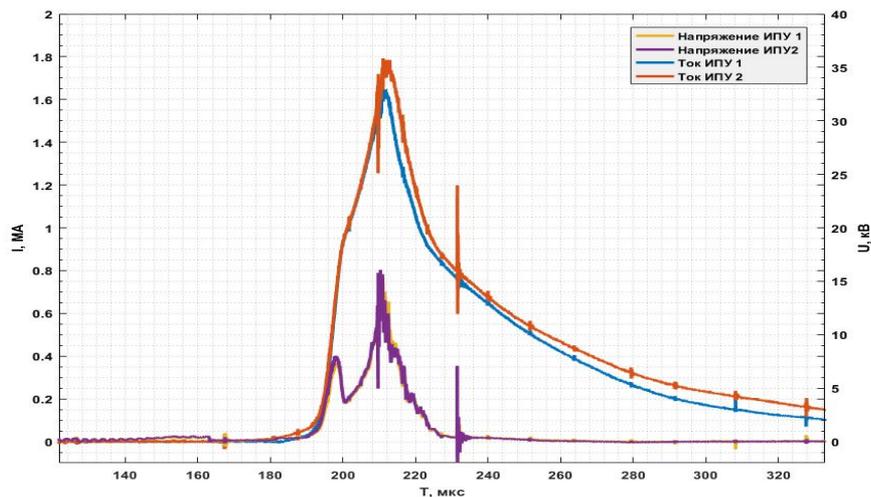


Рис. 4. Токи и напряжения в двух параллельных ИПУ, и общее напряжение на токосборнике при параллельном подключении 2-х ускорителей

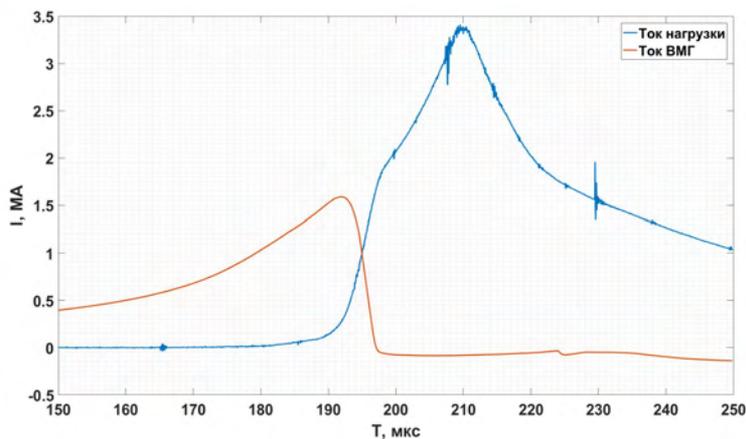


Рис. 5. Суммарный ток в нагрузке и ток через размыкатель ВМГ

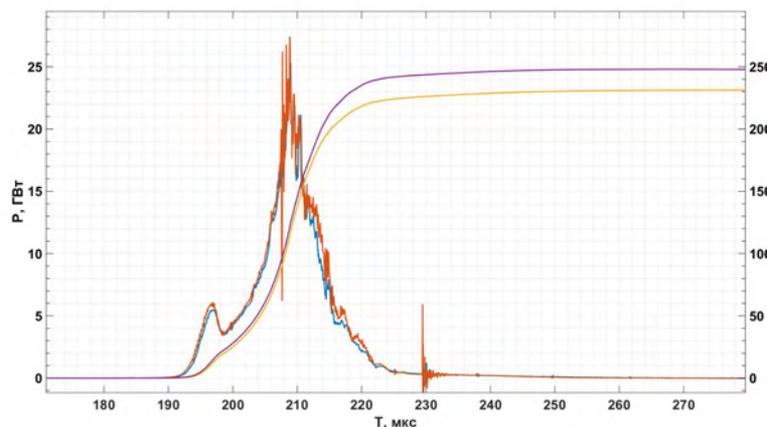


Рис. 6. Мощности и энерговклад для каждой ветви нагрузки

гласования временной диаграммы работы ВМГ с динамикой работы нагрузки.

Проведенная серия экспериментов показала, что выбранные решения по согласованию ВМГ и нагрузки типа ИПУ позволяют оптимизировать

режим ввода энергии в нагрузку с целью максимизировать полную подведенную энергию. В последнем эксперименте суммарная энергия, подведенная к паре ИПУ в одном импульсе, достигала 0,5 МДж, максимальный ток – до 3,8 МА. Таким образом, один ВМГ в указанной схеме кратно превзошел по энергии две отдельные высоковольтные батареи класса 24 кВ емкостью 1 мФ каждая.

### Заключение

Эксперименты подтвердили возможность эффективного согласования источника питания на базе ВМГ разработанной конструкции с конкретными типами плазменной нагрузки в мегаджоульном диапазоне энергий благодаря возможности управления параметрами импульсного тока ВМГ. Приведенные результаты экспериментов показали, что к инжектору подводится требуемая энергия в 0,5 МДж и импульсный ток с амплитудой 3,5 МА.

Работа выполнялась в рамках совместного договора № 135/17Р между ОИВТ РАН и АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».

### Список литературы

1. Борискин А. С., Буренков П. Н., Голяков П. И., Демидов В. А., Жданов В. С., Казаков С. А., Корнилов В. Г., Пресняков Д. В., Селемир В. Д., Толшмяков Д. А., Шаповалов Е. В. Сильноточный плазменный прерыватель тока с запиткой от взрывомагнитного генератора // Письма в Журнал технической физики. 2006. Т. 32. № 21. С. 7–10.

2. Delamere P., Stenbaek N., Nielsen H., Pfaff R. et al. Dynamics of the Active Plasma Experiment North Star Artificial Plasma Jet // J. Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41. № 4. P. 503

3. Позняк И. М., Климов Н. С., Подковыров В. Л., Сафронов В. М., Житлухин А. М., Коваленко Д. В. Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазм // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2012. № 4. С. 23–33

4. Иващенко Д. М., Каменский В. А., Кочергин В. В., Метелев А. П., Микулин И. Н., Мищенко В. В., Федоров А. А., Членов А. М., Долгачев Г. И. Эксперименты с плазменным прерывателем тока на ускорителе УИН-10 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2008. № 2. С. 135–140.

5. Дудин С. В., Житлухин А. М., Козлов А. В., Леонтьев А. А., Минцев В. Б., Ушнурцев А. Е., Фортвов В. Е., Черковец В. Е., Шурупов А. В., Шурупов Н. П. Взрывомагнитный генератор как источник электропитания импульсного плазменного ускорителя // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48. № 1. С. 3–8.

6. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / М.: Мир, 1972.

7. Фортвов В. Е. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В. Е. Фортвова. М.: Наука, 2002.

8. Сиднев В. В., Скворцов Ю. В., Умрихин Н. М., Хамидуллин Ф. Р. Импульсные плазменные ускорители большой мощности // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, 1983. Вып. 2 (12). С. 12–26.