

УДК 621.316.549

ВЗРЫВОМАГНИТНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА С РЕГУЛИРУЕМЫМ ВЫХОДНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

П. В. Дудай, А. А. Зименков, В. А. Иванов, Е. И. Иванов,
Г. В. Карпов, С. М. Полюшко, А. Н. Скобелев, А. Ю. Февралев

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия
E-mails: duday@elph.vniief.ru, zimenkov@elph.vniief.ru,
vaivanov@elph.vniief.ru, eiivanov@elph.vniief.ru, karpov@elph.vniief.ru,
polushko@elph.vniief.ru, anskobelev@elph.vniief.ru, ayfevrlev@elph.vniief.ru

Приведено описание малогабаритного взрывного источника тока с регулируемым выходным напряжением, формирующего импульс тока мегаамперного уровня. Источник состоит из спирального взрывомагнитного генератора и взрывного секционированного размыкателя тока и предназначен для запитки газоразрядных камер типа “плазменный фокус”. Регулирование выходного напряжения импульсного источника тока осуществляется за счет того, что в каждой из последовательно соединенных секций взрывного размыкателя тока формирование напряжения происходит с заданным временным сдвигом относительно соседней секции.

Ключевые слова: взрывомагнитный генератор, взрывной размыкатель тока, плазменная камера.

Введение. При работе с плазмофокусными источниками нейтронов, запитываемыми от взрывомагнитных источников тока, существует проблема обеспечения во взрывных экспериментах гарантированной величины выхода нейтронов, особенно при амплитудах тока в плазмофокусной камере $1,5 \div 2,0$ МА, соответствующих рекордному выходу нейтронов. Нередко в плазменной камере, нормально работающей в лабораторных условиях, при той же амплитуде разрядного тока во взрывном эксперименте выход нейтронов равен нулю. Срыв генерации нейтронов может быть обусловлен тем, что во взрывных экспериментах заданная амплитуда разрядного тока обычно достигается при существенно большем максимальном напряжении на входе в камеру по сравнению с экспериментами, в которых используются конденсаторные установки.

Во взрывных экспериментах напряжение на входе в камеру обычно имеет амплитуду $70 \div 80$ кВ при длительности импульса менее 1 мкс. Внутри разрядной камеры длительность плазменных процессов (формирование плазменной оболочки, движение оболочки вдоль потенциального электрода с последующим схлопыванием вблизи торца) зависит от геометрии электродов, давления рабочего газа, величины разрядного тока и, как правило, составляет приблизительно 3 мкс (для камер типа камеры Мейзера [1, 2]). Поэтому целесообразна разработка взрывного источника тока с более длительным временем его нарастания. В оптимальном варианте запитки плазмофокусной камеры импульс напряжения

можно представить в виде прямоугольника (значение напряжения $30 \div 40$ кВ, длительность импульса равна промежутку времени между моментом формирования плазменной оболочки и моментом ее схлопывания вблизи торца анода).

Целью данной работы является создание взрывомагнитного источника тока на основе спирального взрывомагнитного генератора (СВМГ) и взрывного размыкателя тока (ВРТ), способного формировать программируемый импульс напряжения на входе в нагрузку, обеспечивая в ней ток с максимально возможной амплитудой при времени его нарастания ≈ 2 мкс.

Схема секционированного взрывного размыкателя тока. В настоящее время существует несколько типов ВРТ [3], позволяющих передавать энергию из накопительной индуктивности взрывомагнитного генератора в нагрузку за время порядка 10^{-6} с. Наибольшее распространение получили размыкатели тока с разрывом проводника на ребристой преграде и размыкатели с разрывом проводника диэлектрическими кумулятивными струями [3, 4].

На рис. 1, 2 приведены схема соединения ВМГ, ВРТ и жесткой индуктивной нагрузки L_{load} и соответствующая электрическая схема. В момент начала передачи накопительной индуктивности ВМГ в нагрузку магнитный поток сосредоточен в накопительной индуктивности ВМГ ($\Phi_0 = L_{EMG} I_{EMG}(0)$).

В системах с перебросом магнитного потока для уменьшения энергетических потерь индуктивность нагрузки обычно выбирается равной накопительной индуктивности, поэтому для упрощения выкладок положим индуктивность нагрузки L_{load} равной конечной индуктивности ВМГ: $L_{EMG} = L_{load} = L$. Решение соответствующих дифференциальных уравнений принимает вид

$$I_{EMG} = \frac{\Phi_0}{2L} \left(1 + \exp \left(-2 \int \frac{R(t)}{L} dt \right) \right), \quad I_{load} = \frac{\Phi_0}{2L} \left(1 - \exp \left(-2 \int \frac{R(t)}{L} dt \right) \right),$$

а выражение для напряжения $U(t)$ на нагрузке можно записать следующим образом:

$$U(t) = I_R R(t) = \Phi_0 \frac{R(t)}{L} \exp \left(-2 \int \frac{R(t)}{L} dt \right).$$

В случае если материал разрываемого проводника, его размеры, число разрывов на единицу длины проводника, материал струеформирователя выбраны, форму импульса на-

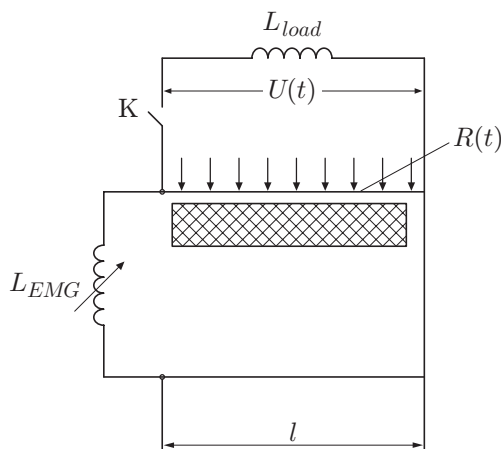


Рис. 1

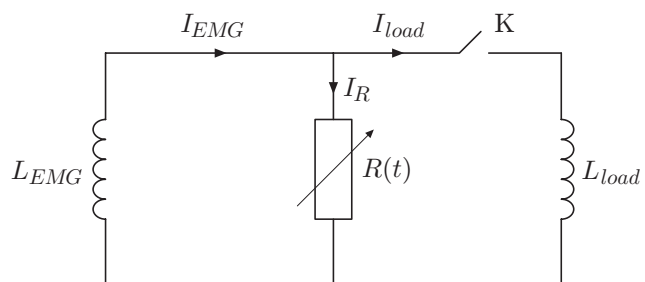


Рис. 2

Рис. 1. Схема источника тока на основе ВМГ и ВРТ

Рис. 2. Электрическая схема источника тока на основе ВМГ и ВРТ

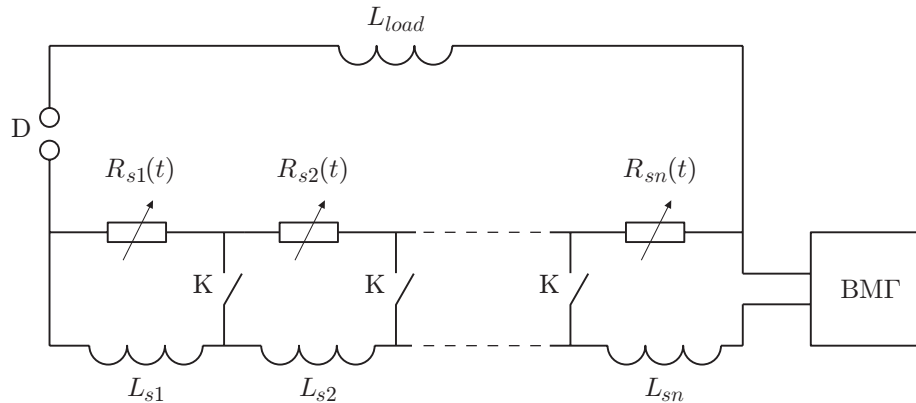


Рис. 3. Электрическая схема секционированного ВРТ

пряжения, определяемую законом изменения сопротивления $R(t)$, для генераторов тока, изготовленных по приведенной схеме, нельзя существенно изменять. Однако при работе с некоторыми нагрузками может возникнуть необходимость такого изменения.

По мнению авторов данной работы, наиболее перспективными генераторами импульсов напряжения заданной формы являются секционированные ВРТ [5] с программируемым включением секций. Электрическая схема секционированного ВРТ приведена на рис. 3. Сопротивление размыкателя $R(t)$ равно сумме n последовательно соединенных секционных сопротивлений: $R(t) = \sum_{i=1}^n R_{si}(t)$, а конечная индуктивность ВМГ — сумме n последо-

вательно соединенных секционных индуктивностей: $L = \sum_{i=1}^n L_{si}$. В исходном состоянии

разрядник D и ключ K разомкнуты, в секционных индуктивностях с помощью ВМГ создается начальный магнитный поток. Работа размыкателя начинается с момента начала роста сопротивлений R_{si} секций ВРТ после замыкания ключей K . При такой схеме устройства каждая секция представляет собой отдельный генератор, напряжение которого суммируется с напряжениями остальных генераторов. В случае если все секции ВРТ работают синхронно, напряжение на нагрузке равно сумме напряжений в каждой секции. Программируя включение секций ВРТ, можно варьировать форму импульса генерируемого суммарного напряжения. Проведенные ранее эксперименты на моделях с плоской геометрией ВРТ [5] подтвердили возможность реализации таких условий, но при сравнительно малых токах.

Эксперимент с цилиндрическим секционированным размыкателем при одновременном срабатывании секций. Эксперимент 1 проводился с цилиндрическим 10-секционным ВРТ диаметром 160 мм, запитываемым от спирального ВМГ диаметром 100 мм. В качестве жесткой нагрузки использовался коаксиал с индуктивностью, равной 30 нГн. Общий вид экспериментального устройства показан на рис. 4. Эксперимент 1 проводился при одновременном срабатывании секций. Время нарастания тока в нагрузке составило 1 мкс при амплитуде 1,3 МА. При этом максимальное напряжение, генерируемое 10-секционным ВРТ, приближенно равно 75 кВ.

Результаты экспериментов с секционированным размыкателем при разновременном срабатывании секций. Временной сдвиг формирования импульса напряжения в каждой секции можно осуществить либо путем использования в секциях разрушаемых проводников различной толщины, либо путем изменения времени подлета стенки

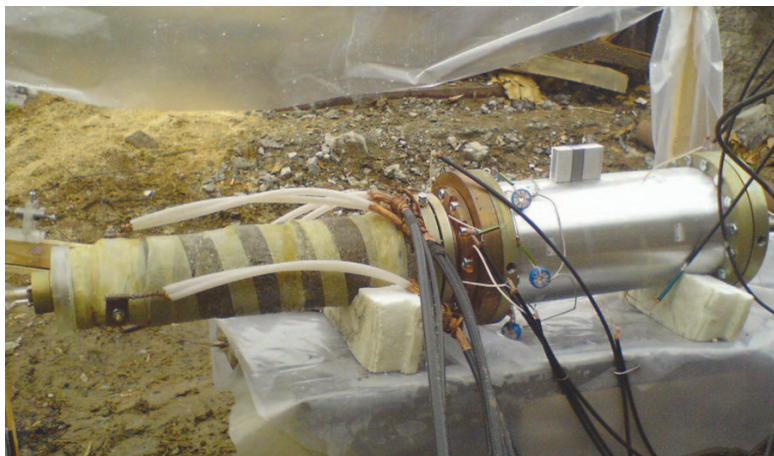


Рис. 4. Общий вид экспериментального устройства

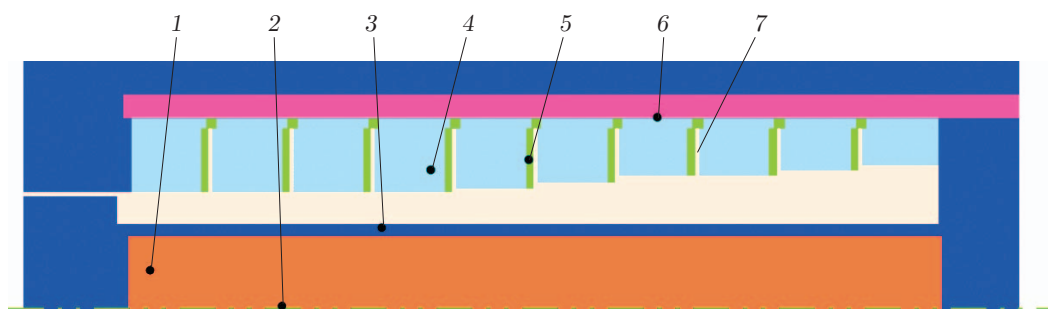


Рис. 5. Схема ВРТ с разновременным срабатыванием секций:

1 — заряд ВВ, 2 — радиальный электродетонатор, 3 — внутренний токопровод, 4 — полиэтиленовый струеформирователь, 5 — металлический штырь, 6 — разрушаемый проводник с током, 7 — воздушный зазор

внутреннего токопровода к поверхности струеформирователя в каждой секции. Разное время полета стенки внутреннего токопровода к струеформирователю можно реализовать несколькими способами:

- создать в каждой секции разные по величине зазоры между внутренним токопроводом и струеформирователем;
- использовать в каждой секции стенки внутреннего токопровода различной толщины;
- использовать для ускорения движения стенки внутреннего токопровода заряды взрывчатого вещества (ВВ) различной толщины.

В конструкции ВРТ, схема которого приведена на рис. 5, разные по величине зазоры между внутренним токопроводом и струеформирователем созданы за счет использования в секциях струеформирователей различной толщины. В каждой следующей секции (начиная от нагрузки) зазор между внутренним токопроводом и струеформирователем уменьшался. Такая конструкция ВРТ позволяет решить три задачи: во-первых, максимально сжать магнитный поток с помощью внутреннего токопровода в объеме струеформирователя, во-вторых, обеспечить формирование кумулятивных полиэтиленовых струй за счет удара внутреннего токопровода о струеформирователь и, в-третьих, обеспечить разновременное срабатывание секций.

Взрывной размыкатель тока данной конструкции работает следующим образом. После окончания работы СВМГ инициируется заряд ВВ 1 взрывного размыкателя с помощью

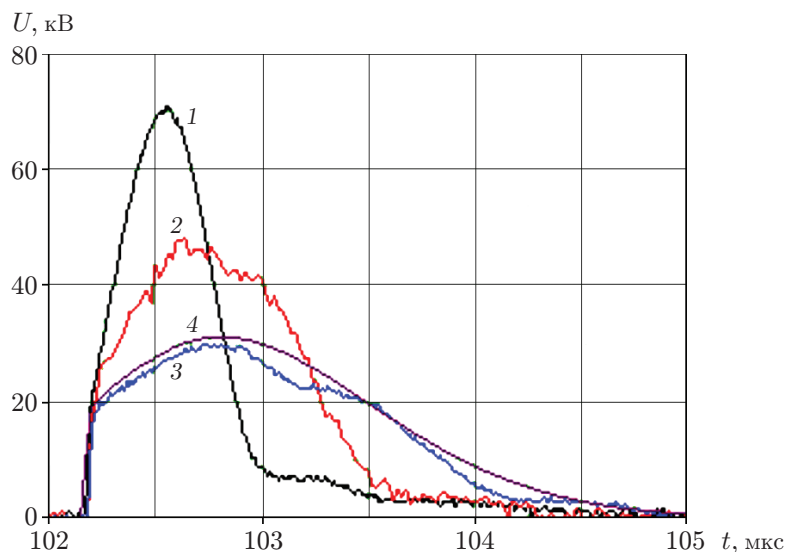


Рис. 6. Зависимости напряжения от времени при одном и том же значении тока в ВРТ: 1–3 — экспериментальные данные (1 — эксперимент 1, 2 — эксперимент 2, 3 — эксперимент 3), 4 — результаты расчетов, соответствующие эксперименту 3

В соответствии с данными электротехнических расчетов предполагалось, что во втором эксперименте напряжение на нагрузке не превысит 30 кВ. Однако зарегистрированное в эксперименте максимальное напряжение на нагрузке оказалось существенно больше и составило ≈ 48 кВ при амплитуде тока 1,4 МА. Длительность импульса напряжения равна 1,5 мкс. Поэтому при подготовке эксперимента 3 был проведен более детальный расчет динамики внутреннего токопровода ВРТ и выхода ударной волны на внешнюю поверхность струеформователя. Для этого выполнены двумерные газодинамические расчеты по программе AUTODIN. В расчетах исследовалось движение внутреннего электрода и определялось время выхода ударной волны на внешнюю поверхность струеформователя. На основе результатов газодинамических расчетов определялся момент выхода ударной волны на внешнюю поверхность струеформователя.

Используя данные о выходе ударной волны на внешнюю поверхность струеформователя, можно более точно оценить сдвиг по времени срабатывания секций относительно друг друга. Найденные сдвиги по времени использовались в электротехнических расчетах при выборе внутренних диаметров секционных струеформователей в конструкции ВРТ для эксперимента 3.

Максимальное напряжение на нагрузке, зарегистрированное в эксперименте 3, составило ≈ 30 кВ при амплитуде тока $\approx 1,5$ МА. Длительность импульса напряжения ≈ 2 мкс.

Величина тока в нагрузке и напряжение на нагрузке пропорциональны конечному току СВМГ. В таблице и на рис. 6 представлены данные, полученные в трех экспериментах, при одном и том же значении разрываемого тока ($(\dot{I}_{load})_{max}$ — максимальная производная тока в нагрузке; $(U_{вх})_{max}$ — максимальное напряжение на входе нагрузки; $t_{имп}$ — время нарастания тока в нагрузке).

На рис. 6 приведена также расчетная зависимость напряжения от времени, соответствующая данным эксперимента 3 (кривая 4) и полученная с использованием результатов газодинамических расчетов задачи о выходе ударной волны на внешнюю поверхность струеформователя.

Удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о том, что за счет подбора внутренних диаметров секционных струеформи-

Выходные параметры импульсного источника тока

Номер эксперимента	$(\dot{I}_{load})_{max} \cdot 10^{-12}$, А/с	$(U_{вх})_{max}$, кВ	$t_{имп}$, мкс
1	2,32	70	1,0
2	1,61	48	1,5
3	1,00	30	2,0

рователей можно существенно уменьшить амплитуду импульса напряжения и увеличить его длительность. При этом максимальный ток в нагрузке остается практически неизменным.

Заключение. В работе приведено описание взрывного источника тока с регулируемым выходным напряжением, состоящего из спирального взрывомагнитного генератора и секционированного взрывного размыкателя тока и позволяющего создать в нагрузке необходимую амплитуду тока. Источник тока способен обеспечить заданную форму импульса напряжения на входе в исследуемую нагрузку за счет программируемого срабатывания секций взрывного размыкателя. Для определения моментов времени срабатывания секций взрывного обострителя тока используются результаты двумерных газодинамических расчетов. В ходе экспериментов удалось получить величину тока 1,5 МА с временем нарастания 2 мкс в эквивалентной нагрузке с индуктивностью 30 нГн при амплитуде напряжения на входе, не превышающей 30 кВ. Применение данного источника тока позволяет реализовать различные режимы запитки камер типа “плазменный фокус” для обеспечения максимального выхода нейтронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mather J. W., Bottoms P. J.** Characteristics of the dense plasma focus discharge // J. Phys. Fluid. 1968. V. 11, N 3. P. 611–618.
2. **Tucker T. J., Turman V. N.** Modeling and scaling experiments of explosive driven pulse systems // Digest of technical paper 3rd IEEE Intern. pulsed power conf., Albuquerque, 1981. Albuquerque: IEEE, 1981. P. 334–336.
3. **Чернышев В. К.** Сверхмощные взрывомагнитные источники энергии для термоядерных и физических исследований // Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам “Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения”, Саров, 5–10 авг. 1997 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 41–58.
4. **Чернышев В. К., Иванов В. А., Скобелев А. Н. и др.** Формирование диэлектрических кумулятивных струй для мегаамперных размыкателей тока // Тр. Междунар. конф. “III Харитоновские чтения: Экстремальные состояния вещества. Детонация, ударные волны”. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2002. С. 269–273.
5. **А. с. 2430444 RU, МПК Н 01 Н 39/00.** Способ регулирования параметров выходного напряжения взрывомагнитного формирователя импульса тока и устройство для его осуществления / П. В. Дудай, А. А. Зименков, В. А. Иванов, А. С. Немчинов, С. В. Пак, А. Н. Скобелев, А. Ю. Февралев, С. М. Полюшко, П. Н. Гуськов. Оpubл. 27.09.11, Бюл. № 27.

Поступила в редакцию 16/X 2014 г.