

## ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ БЫСТРОЙ ЗАРЯДКИ ФОРМИРУЮЩИХ ЛИНИЙ

© 2011 г. К. В. Горбачёв, Е. В. Нестеров, В. А. Строганов, Е. В. Черных

*Объединенный институт высоких температур РАН  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2*

Поступила в редакцию 15.07.2010 г.  
После доработки 24.12.2010 г.

Описано автономное наносекундное зарядное устройство для короткой формирующей линии, созданное на основе индуктивного накопителя энергии. Накопление энергии осуществляется током взрывного магнитокумулятивного генератора, а вывод энергии в нагрузку — посредством электро-взрывного прерывателя тока. Использование вместо одного двухкаскадного магнитокумулятивного генератора, состоящего из предусилителя и динамического трансформатора, двух генераторов меньшего размера с последовательным соединением вторичных обмоток динамических трансформаторов, одна из которых соединена с индуктивным накопителем, а другая — с прерывателем тока, позволило существенно увеличить напряжение зарядки линии. В результате за время порядка 100 нс удалось зарядить формирующую линию с электрической длиной 5 нс до напряжения  $\geq 1$  МВ.

### ВВЕДЕНИЕ

Короткие формирующие линии широко применяются в мощных генераторах электромагнитной энергии в экспериментальной физике высоких плотностей энергии. Для сокращения размеров формирующих линий в качестве диэлектрика в них применяют полярные жидкости, обладающие как высокой диэлектрической проницаемостью, так и относительно большой электропроводностью. Повышение электропрочности диэлектрика и снижение потерь энергии, связанных с токами утечки, достигается сокращением времени зарядки формирующих линий до долей микросекунды.

Для зарядки формирующих линий главным образом применяют генераторы импульсов напряжения по схеме Маркса на основе параллельно заряжаемых высоковольтных импульсных конденсаторов. Плотность запасаемой энергии в высоковольтных импульсных конденсаторах, несмотря на существенный прогресс в их технологии, не превышает  $0.2\text{--}0.3$  Дж/см<sup>3</sup>. Если учесть, что в основном используются генераторы импульсов напряжения закрытого типа с масляной изоляцией и что масса первичных зарядных высоковольтных устройств довольно велика, то в совокупности генераторы импульсов высокого напряжения представляют собой громоздкие и массивные устройства.

Целью данной работы является создание компактных устройств зарядки формирующих линий с мегавольтным уровнем напряжения путем ис-

пользования индуктивного накопителя энергии, энергоемкость которого на порядки выше, чем у емкостных накопителей. В качестве первичного источника тока для зарядки индуктивного накопителя предлагается использовать эквивалентный ему по энергоемкости магнитокумулятивный генератор. При выборе ключа для вывода энергии накопителя в нагрузку мы отдали предпочтение электровзрывному прерывателю тока, поскольку взрывные прерыватели медленны, полупроводниковые слаботочны, плазмозероизионные обладают малым конечным сопротивлением и требуют дополнительного источника для питания плазменных инжекторов.

### КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ И ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СОГЛАСОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ПРЕРЫВАТЕЛЯ С МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ТОКА

Для достижения высоких коэффициентов передачи энергии из индуктивного накопителя в нагрузку с помощью электровзрывного прерывателя тока необходимо определить оптимальные сочетания параметров электровзрывного прерывателя тока и источника накачки. В этом случае сопротивление прерывателя в стадии накопления энергии будет минимально ограничивать ток накачки, а введенная в проводники удельная энергия к началу стадии вывода — достаточна для их перехода в непроводящее состояние.

В работе [1] проработаны методы физического моделирования на базе теорий подобия и размерности и выработаны следующие пути повышения эффективности передачи энергии в емкостную нагрузку:

1) более раннее и при большем токе в индуктивности подключение емкостной нагрузки;

2) использование прерывателя меньшей длины для сохранения высокой плотности энергии, введенной в проводники прерывателя.

Эти соображения справедливы и при использовании магнитокумулятивных генераторов. Однако полученные в [1] сочетания параметров электрического контура, оптимальные с точки зрения передачи энергии из первичного емкостного накопителя энергии в емкостную нагрузку, не могут быть непосредственно использованы для контуров с взрывными магнитокумулятивными генераторами.

Более продуктивными для предварительного выбора параметров устройства зарядки короткой формирующей линии с взрывным магнитокумулятивным генератором являются результаты работ, изложенные в [2]. В этой работе приведены две разного уровня полуэмпирические математические модели электровзрывного прерывателя тока (э.в.п.т.).

Первая модель позволяет сузить диапазон изменения независимых переменных и служит для предварительного выбора параметров. Согласно этой модели, на второй взрывной стадии принятые постоянными значения инкремента сопротивления прерывателя и продольной напряженности электрического поля увеличиваются с уменьшением  $t_{эф}$  — эффективного времени по интегралу действия тока, проходящего по проводникам электровзрывного прерывателя.

Выражение для  $t_{эф}$  записывается следующим образом

$$t_{эф} = \frac{\int_0^{t_{ee}} I^2(t) dt}{I_m^2}, \quad (1)$$

где  $I_m$  — максимальное значение тока через э.в.п.т.;  $t_{ee}$  — момент достижения начальной точки электрического взрыва, определяемый числом проводников прерывателя для заданного значения диаметра проводников. При этом каждому значению  $t_{эф}$  соответствуют определенные, отличающиеся друг от друга в два раза оптимальные значения диаметра проводников прерывателя:  $d_{opt}^{E_m} = 2d_{opt}^{\beta} = 24t_{эф}$ . При диаметре проводников прерывателя тока  $d_{пт} = d_{opt}^{\beta}$  реализуется максимальный инкремент сопротив-

ления проводников  $\beta_{opt} = 62/t_{эф}$ , а при  $d_{пт} = d_{opt}^{E_m}$  достигается максимальная пиковая напряженность электрического поля в э.в.п.т.  $E_m = 1.15 \cdot 10^3 / \sqrt{t_{эф}}$ . Очевидно, что оптимальное по напряжению зарядки емкости значение  $d_{opt}^P$  должно находиться между значениями  $d_{opt}^{\beta}$  и  $d_{opt}^{E_m}$ .

Во второй более совершенной модели значения инкремента сопротивления прерывателя и продольной напряженности электрического поля являются функциями удельного энергосодержания  $w$  проводников.

Обсудим основные конфигурации взрывных магнитокумулятивных генераторов с точки зрения возможности минимизации эффективного времени. Сначала рассмотрим вариант прямой зарядки взрывного магнитокумулятивного генератора, нагруженного на индуктивную нагрузку при закороченном э.в.п.т.

Если при этом не учитывать вклад в интеграл действия тока начальной зарядки взрывного магнитокумулятивного генератора, потери в последнем можно оценить с помощью так называемого коэффициента качества генератора

$$F = \frac{\ln(I(t)/I_0)}{\ln(\lambda(t) + 1)}$$

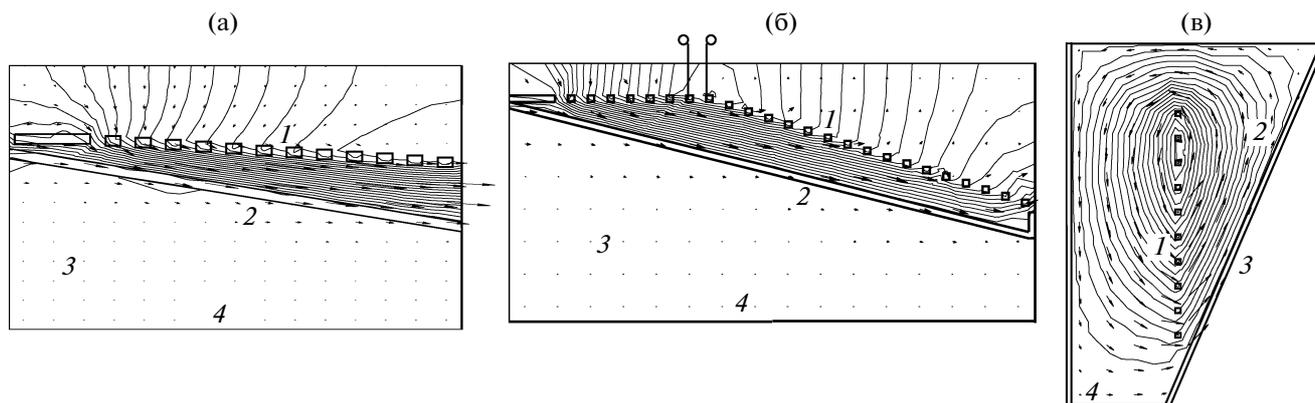
Здесь  $\lambda(t) = L(t)/L_{ин}$ , где  $L(t)$  — закон вывода индуктивности взрывного магнитокумулятивного генератора,  $L_{ин}$  — индуктивность накопителя. Если принять  $F$  постоянным, то выражение для  $t_{эф}$  примет следующий вид:

$$t_{эф} = \int_0^{t_f} \frac{dt}{(\lambda(t) + 1)^{2F}}, \quad (2)$$

где  $t_f$  — время полного вывода индуктивности взрывного магнитокумулятивного генератора. Из (2) видно, что эффективное время снижается с увеличением  $\lambda$  и  $F$ .

Что касается влияния на величину эффективного времени нормированного закона вывода индуктивности генератора  $\lambda(t)$ , то, как показывают результаты анализа расчетов и экспериментов, для обеспечения малых значений  $t_{эф}$  при условии торцевого иницирования заряда взрывчатого вещества (в.в.) в лайнере следует использовать взрывные магнитокумулятивные генераторы следующих четырех типов:

- с цилиндрической спиралью малой длины;
- с конической спиралью с углом при вершине  $\theta$  меньше угла  $\alpha$  разлетающегося в виде конуса лайнера;
- с конической спиралью с углом при вершине, большим угла раскрытия лайнера [3], в комбинации с участком цилиндрической спирали;
- дисковый с плоской архимедовой спиралью.



**Рис. 1.** Конфигурации трех быстроходных взрывных магнитокумулятивных генераторов (а – цилиндрический, б – конусный, в – дисковый) с картинами полей магнитной индукции при положении лайнера в момент замыкания их цепей с индуктивными накопителями энергии. 1 – спираль генератора, 2 – лайнер, 3 – продукты детонации заряда в.в., 4 – ось симметрии. Плоский заряд в.в. дискового генератора на рис. 1в инициируется в точке на его оси.

Мы не рассматриваем здесь взрывной магнитокумулятивный генератор с осевым инициированием заряда, который также обладает малой величиной  $t_{эф}$ . Такой генератор требует для эффективной генерации тока сложную систему инициирования, которая в силу значительного объема не может использоваться во взрывных магнитокумулятивных генераторах с небольшими радиальными размерами.

Конфигурации трех взрывных магнитокумулятивных генераторов вместе с картинами полей магнитной индукции в момент замыкания цепи “взрывной магнитокумулятивный генератор – индуктивный накопитель энергии” показаны на рис. 1. Картины поля построены с помощью компьютерной программы ELCUT [4].

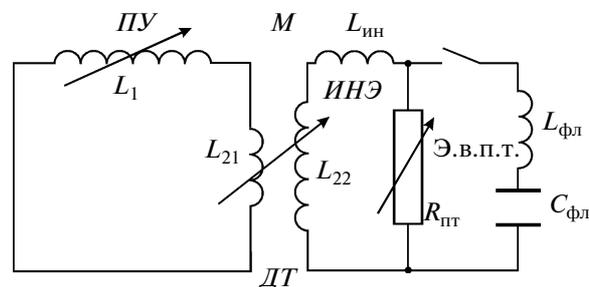
Взрывной магнитокумулятивный генератор на рис. 1б в отличие от рассмотренного в [3] дополнен участком цилиндрической спирали. Такая конфигурация позволяет увеличить коэффициент усиления энергии и снизить  $t_{эф}$  при неизменном полном времени компрессии поля за счет увеличения начальной индуктивности. В противном случае такой генератор сильно проигрывает по коэффициенту усиления энергии генераторам трех других типов. Выходными электродами этого генератора являются последний виток цилиндрической части спирали и первый виток конической части спирали.

Для всех без исключения конфигураций взрывного магнитокумулятивного генератора использование метода перехвата магнитного потока позволяет дополнительно снизить эффективное время. В этом случае реализуется взрывной магнитокумулятивный генератор с внешним возбуждением или так называемый динамический трансформа-

тор. Как показано на рис. 2, последний состоит из внешней (первичной) обмотки с малым числом витков и внутренней (вторичной) обмотки с большим числом витков. Ток в первичной обмотке обеспечивается взрывным магнитокумулятивным генератором (предусилителем) или другим источником тока.

Предусилитель – это высокоиндуктивный магнитокумулятивный генератор со слабым магнитным взаимодействием магнитного поля и лайнера, имеющий малый к.п.д. (единицы процентов). Тем не менее, этот генератор по энергоемкости на порядок превосходит емкостные накопители и, обладая высоким коэффициентом усиления энергии, позволяет двухкаскадному магнитокумулятивному генератору работать в автономном режиме.

В момент замыкания стенкой расширяющегося лайнера цепи вторичной обмотки динамического трансформатора происходит перехват вто-



**Рис. 2.** Эквивалентная электрическая схема зарядки формирующей линии с помощью двухкаскадного с динамическим трансформатором ДТ взрывного магнитокумулятивного генератора, индуктивного накопителя энергии ИНЭ и электровзрывного прерывателя тока. М – взаимная индукция обмоток динамического трансформатора; ПУ – предусилитель.

ричной обмоткой магнитного потока, созданного предусилителем в первичной обмотке. Важным достоинством схемы является изоляция нагрузки во время накачки током первичной обмотки динамического трансформатора.

Для вычисления по формуле (1) эффективного времени протекания тока вторичной обмотки динамического трансформатора по индуктивному накопителю можно воспользоваться выражением для текущего значения этого тока из [5]:

$$I_{22}(t) = \frac{\Phi_{21}(t_c) \left[ \frac{M(t_c)}{L_{21}(t_c) \left[ \frac{L_{22}(t_c) + L_{ин}}{L_{22}(t) + L_{ин}} \right]^{(1-F_{22})}} - \frac{M(t)}{L_{21}(t)} \right]}{\left( 1 - \frac{M^2(t)}{L_{22}(t)L_{21}(t)} \right) L_{22}(t) + L_{ин}}$$

где  $M$  – взаимная индукция обмоток динамического трансформатора;  $\Phi_{21}$  – магнитный поток в первичной обмотке;  $L_{21}$ ,  $L_{22}$  – индуктивность первичной и вторичной обмоток соответственно;  $t_c$  – момент перехвата магнитного потока;  $F_{22}$  – коэффициент качества вторичной обмотки.

С использованием программы ELCUT выполнены расчеты временных зависимостей как индуктивностей взрывных магнитокумулятивных генераторов при прямой зарядке током, так и индуктивностей и взаимной индуктивности обмоток динамического трансформатора, также рассчитаны значения эффективного времени по формуле (1).

На рис. 3 представлены зависимости  $t_{эф}(\lambda_0)$  (где  $\lambda_0 = L_0/L_{ин}$ ,  $L_0$  – начальная индуктивность генератора) для динамического трансформатора и взрывного магнитокумулятивного генератора, имеющих конические спирали с  $\theta < \alpha$ , для одинаковых законов вывода их индуктивностей.

При небольших значениях  $\lambda_0$  эффективное время в случае использования динамического транс-

форматора существенно меньше  $t_{эф}$  непосредственно заряжаемого взрывного магнитокумулятивного генератора. При весьма большом коэффициенте  $\lambda_0$  значения эффективных времен для рассмотренных конфигураций взрывных магнитокумулятивных генераторов и динамических трансформаторов сближаются.

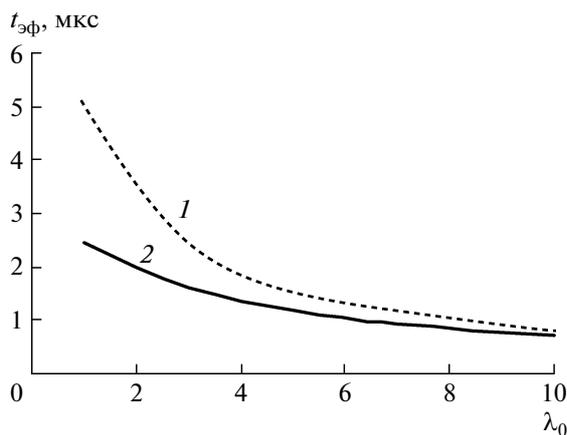
Взрывные магнитокумулятивные генераторы и динамические трансформаторы, предназначенные для работы на высокоимпедансные нагрузки, имеют невысокие коэффициенты перестройки индуктивностей. Причина тому – высокие напряженности электрических полей, большая толщина изоляции проводов, малые времена вывода индуктивности вторичной обмотки и высокое значение индуктивности накопителей энергии. Таким образом, выявляется еще одно преимущество использования динамических трансформаторов в системах с индуктивными накопителями энергии и электровзрывными прерывателями тока.

В табл. 1 приведены значения  $t_{эф}$  для каждой из рассмотренных конфигураций спиралей динамических трансформаторов при двух начальных значениях коэффициента перестройки индуктивностей  $\lambda_0 = 1$  и  $\lambda_0 = 10$ .

Все генераторы имели одинаковый шаг спиралей. До подрыва заряда диаметры цилиндрических лайнеров были равны 30 мм, а максимальные диаметры спиралей – 70 мм. Наружный диаметр плоской спирали дискового генератора составил 125 мм. На рис. 4 приведены соответствующие временные зависимости вывода индуктивности  $\lambda(t)$ , нормированные на начальное значение  $\lambda_0 = 10$ .

Наименьшим значением  $t_{эф}$  обладает спиральный взрывной магнитокумулятивный генератор с комбинированной спиралью.

Чтобы сделать окончательный выбор в пользу той или иной конфигурации спирали, следует выработать дополнительный критерий сравнения. Поскольку нас интересует напряжение зарядки формирующей линии, то в качестве такого критерия можно предложить пропорциональное напряжению на э.в.п.т. произведение  $\Phi_{ин}^m \beta$ , где  $\Phi_{ин}^m$  – максимальный магнитный поток в индуктивном



**Рис. 3.** Зависимости эффективного времени протекания тока по проволокам э.в.п.т. от коэффициента перестройки индуктивностей  $\lambda_0$  для взрывного магнитокумулятивного генератора с прямой зарядкой током (1) и динамического трансформатора (2). Для динамического трансформатора  $\lambda_0 = L_{220}/L_{ин}$ , где  $L_{220}$  – начальная индуктивность вторичной обмотки динамического трансформатора.



**Рис. 4.** Нормированные на начальное значение  $\lambda_0 = 10$  законы вывода индуктивностей  $\lambda(t)$  для различных конфигураций спиралей динамических трансформаторов.

накопителе. На  $\Phi_{\text{ин}}^m$  следует наложить ограничение — максимальное напряжение на вторичной обмотке динамических трансформаторов не должно превышать напряжение пробоя изоляции ее проводов.

Если диаметр сечения проводов принять достаточно большим, с тем чтобы считать омические потери магнитного потока малыми по сравнению с потерями, связанными с его отсечками, то для всех конфигураций спиралей с одинаковым шагом напряжение на нагрузке следует положить одинаковым. При этих условиях для каждой формы спиралей были рассчитаны значения  $\Phi_{\text{ин}}^m \beta$  (см. табл. 1), нормированные на напряжение пробоя изоляции провода с диаметром арматуры 1.1 мм и толщиной изоляции 0.45 мм из полиимида и фторопласта. Напряжение пробоя такой комбинированной изоляции составляет 70 кВ.

Как видно из таблицы, вариации значений  $\Phi_{\text{ин}}^m \beta$  оказываются весьма незначительными (~10%).

Следует отметить, что для конических спиралей требования к точности изготовления элементов конструкции взрывного магнитокумулятивного генератора более жесткие. Согласно работе [6], исходя из условия отсутствия перескока точки контакта нами получено выражение для допустимого радиального смещения  $\Delta$  трубки лайнера относительно конической спирали с шагом намотки  $h$ :

$$\Delta = \frac{h |(\text{tg}\alpha - \text{tg}\theta)|}{2\pi}. \quad (3)$$

Таким образом, для конической спирали допуск  $\Delta$  в  $1/(1 - \text{tg}\theta/\text{tg}\alpha)$  раз меньше, чем для цилиндрической спирали. Для плоских спиралей в этом отношении складывается более благоприятная ситуация [7].

Принимая во внимание вышеизложенное, в качестве зарядного устройства мы использовали динамический трансформатор с короткими цилиндрическими либо с плоскими спиральями в зависимости от компоновочных решений.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ С ВЗРЫВНЫМИ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Короткая формирующая линия для проведения экспериментов по ударной ее зарядке была спроектирована, исходя из условия ее минимального объема. Это условие выполняется при использовании в качестве основной изоляции диэлектрика с максимальным значением  $\varepsilon E_{\text{пр}}^2$ , где  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость,  $E_{\text{пр}}$  — импульсная электрическая прочность диэлектрика.

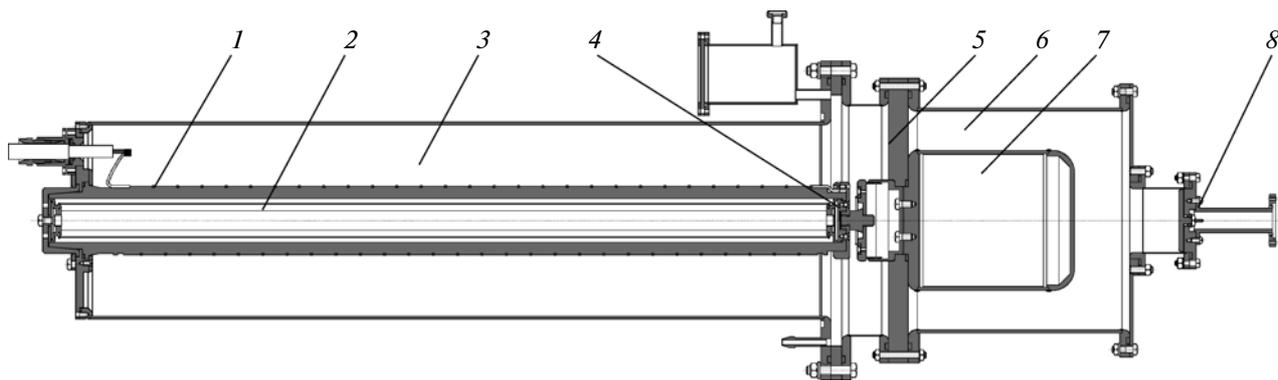
В качестве такого диэлектрика была выбрана очищенная вода, так как при ударном характере воздействия высокого напряжения она имеет высокую электрическую прочность и не требует тщательной деионизации. Эффективная емкость формирующей линии составила 2 нФ, волновое сопротивление  $Z_0 = 3$  Ом, а ее электрическая длина — 5 нс. На рис. 5 показана конструктивная схема короткой формирующей линии с системой обострения импульса тока динамического трансформатора.

Были проведены многовариантные расчеты и выявлены оптимальные по массогабаритным характеристикам параметры рассматриваемой схемы зарядки формирующей линии от двухкаскадного взрывного магнитокумулятивного генератора. Для расчета параметров двухкаскадного взрывного магнитокумулятивного генератора, состоящего из предусилителя и динамического трансформатора с цилиндрическими спиральями, использовались компьютерная программа SOLENOID [8], а для расчета всей схемы в целом — программа FRONT [8]. В последней программе применена вторая математическая модель э.в.п.т.

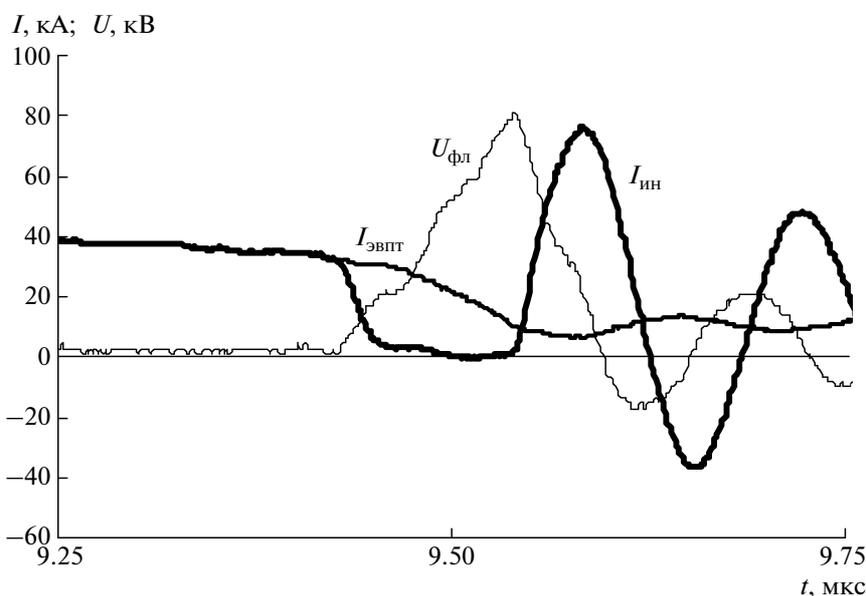
В результате оптимизационных расчетов был выбран вариант двухкаскадного взрывного магнитокумулятивного генератора с цилиндрической геометрией спиралей как предусилителя, так и динамического трансформатора. Наружный диаметр лайнера генератора 39.6 мм, толщина стенки лайнера 1.8 мм, диаметр цилиндрической спирали 80 мм. Эффективное время нарастания тока

**Таблица 1**

Форма спиралей динамического трансформатора	$t_{\text{эф}}$ , мкс		$\Phi_{\text{ин}}^m \beta$
	$\lambda_0 = 1$	$\lambda_0 = 10$	
Цилиндрическая	3.05	1.74	2.15
Коническая, $\theta = 5^\circ$ , $\alpha = 14^\circ$	2.25	1.25	2.5
Цилиндрическая + коническая, $\theta = 18^\circ$ , $\alpha = 14^\circ$	1.18	0.78	2.18
Плоская, $\alpha = 40^\circ$	1.79	0.91	2.39



**Рис. 5.** Конструктивная схема короткой формирующей линии с системой обострения импульса тока динамического трансформатора. 1 – катушка индуктивного накопителя; 2 – проволоки прерывателя тока; 3 – трансформаторное масло; 4 – разрядник; 5 – изолятор; 6 – деионизированная вода; 7 – высоковольтный электрод формирующей линии; 8 – емкостный делитель напряжения.



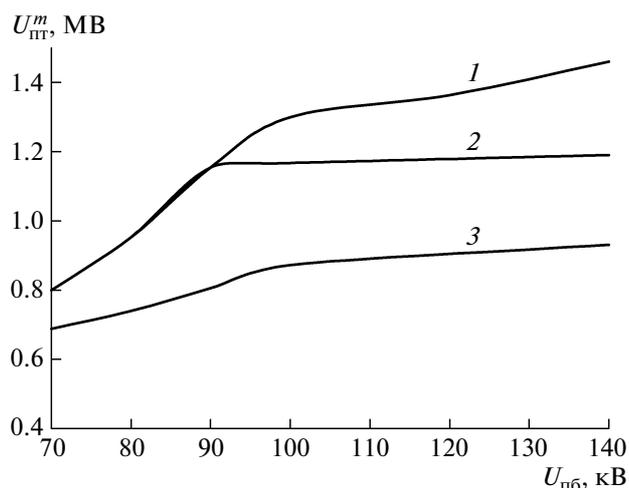
**Рис. 6.** Временные зависимости токов вторичной обмотки  $I_{ИН}$ , тока через э.в.п.т.  $I_{ЭВПТ}$ , напряжения  $U_{фл}$ , измеренного с помощью емкостного делителя напряжения.

при закороченном электровзрывном прерывателе тока  $t_{эф} = 3.45$  мкс. Индуктивность накопителя энергии  $L_{ИН} = 4.2$  мкГ. В экспериментах по зарядке формирующей линии использовался э.в.п.т., состоящий из 16 медных проволок диаметром 0.1 мм и длиной 600 мм.

На рис. 6 представлены временные зависимости основных электрических параметров в элементах устройства зарядки короткой формирующей линии при использовании двухкаскадного взрывного магнитокумулятивного генератора. Газонаполненный разрядник настраивался на срабатывание при напряжении  $\sim 300$  кВ. Всего было проведено в равных условиях 5 успешных экспериментов по зарядке короткой формирующей

щей линии от двухкаскадного взрывного магнитокумулятивного генератора. Напряжение зарядки формирующей линии составило  $(U_{фл})_m = 800 \pm \pm 20$  кВ.

Для генерации более высоких напряжений зарядки короткой формирующей линии от взрывного магнитокумулятивного генератора следует повысить ток, не меняя скорость его нарастания, т.е. увеличить напряжение на выходе динамического трансформатора. Для выявления степени влияния напряжения на клеммах вторичной обмотки динамического трансформатора на усиление мощности генератора э.в.п.т. были проведены расчеты для схемы рис. 2 (без переключения



**Рис. 7.** Зависимости максимального напряжения на э.в.п.т.  $U_{пт}^m$  от напряжения мгновенного пробоя промежутокка лайнер–спираль вторичной обмотки динамического трансформатора при следующих размерах  $l_{пт}$ ,  $d_{пт}$  и количестве  $n$  проволок прерывателя тока: 1 – оптимальная длина проволок  $l_{опт\ пт}$ ,  $n = 36$ ,  $d_{пт} = 0.07$  мм; 2 –  $n = 36$ ,  $l_{пт} = 0.9$  м,  $d_{пт} = 0.07$  мм; 3 –  $n = 9$ ,  $l_{пт} = 0.9$  м,  $d_{пт} = 0.14$  мм.

тока в нагрузку) с помощью вышеперечисленных компьютерных программ.

На рис. 7 показаны зависимости пикового напряжения на э.в.п.т.  $U_{пт}^m$  от напряжения  $U_{пб}$ , при котором происходит электрический пробой промежутокка лайнер–спираль вторичной обмотки динамического трансформатора, для двух значений диаметра проволок э.в.п.т.  $d_{пт}$  при равной площади суммарного поперечного сечения проволок.

Для вариантов расчета (кривые 2, 3), в которых на длину проволок э.в.п.т.  $l_{пт}$  накладывалось ограничение сверху ( $l_{пт} = 0.9$  м), нетрудно видеть, что для каждого значения  $d_{пт}$  существует свое напряжение  $(U_{пб})_{пер}$ , при приближении к которому наблюдается быстрое нарастание пикового напряжения  $U_{пт}^m$ , а при удалении – резкое снижение скорости его нарастания. В случае снятия ограничения на  $l_{пт}$  (кривая 1) точка перелома наблюдается при больших значениях  $U_{пб}$  и справа от нее отмечается больший, чем в первом случае, наклон зависимости  $U_{пт}^m(t)$ .

Расчеты показали, что для цилиндрической начальной геометрии динамического трансформатора при торцевом инициировании заряда лайнера и оптимальных параметрах э.в.п.т. максимальное увеличение мощности динамического трансформатора с помощью э.в.п.т. составляет  $K_y = (U_{пт}/I_{пт})_m / (U_{22}/I_{22})_m = 8-10$ . При этом максимум напряжения достигается при удельной энергии, введенной в материал проволок, равной

энергии сублимации. Это совпадает с результатами экспериментов с емкостными накопителями. Значительный спад напряжения наблюдается при удельной энергии в момент пробоя вторичных обмоток динамического трансформатора, меньшей удельной энергии старта взрывной стадии электровзрыва проволок  $\sim 16$  Дж/мм<sup>3</sup>.

Однако с увеличением напряжения растет толщина изоляции намоточных проводов, а вместе с тем снижаются плотность витков спирали, коэффициент перестройки индуктивностей, усиление энергии. При этом увеличивается эффективное по интегралу действия тока время нарастания импульса тока (см. формулу (2)) и, как следствие, уменьшается инкремент сопротивления проволок э.в.п.т. В результате падает усиление мощности взрывного магнитокумулятивного генератора электровзрывным прерывателем тока.

Радикальный способ уменьшения эффективного времени и увеличения напряжения на выходе окончательного каскада – замена одиночного генератора на ряд последовательно соединяемых по вторичным обмоткам динамических трансформаторов двухкаскадных взрывных магнитокумулятивных генераторов. Классический способ соединения взрывных магнитокумулятивных генераторов в последовательную цепь – это соединение спирали предыдущего генератора с лайнером последующего. По такой схеме в [9] проводили эксперименты с батареей из четырех односпиральных низковольтных взрывных магнитокумулятивных генераторов. В результате магнитный поток удалось увеличить в 3.8 раза, т.е. система практически идеально работала как множитель магнитного потока.

Для соединенных описанным способом одинаковых генераторов с одинаковыми автономными источниками начального магнитного потока потенциал каждого следующего лайнера относительно заземленного лайнера первого взрывного магнитокумулятивного генератора будет равен его порядковому номеру, умноженному на напряжение промежутокка лайнер–спираль единичного взрывного магнитокумулятивного генератора. Поэтому для нормальной работы системы необходимо обеспечить достаточную электрическую прочность среды между лайнерами взрывных магнитокумулятивных генераторов.

Обычно это достигается разнесением генераторов в пространстве, с тем чтобы за время компрессии поля во взрывных магнитокумулятивных генераторах плазменные высокоскоростные потоки, генерируемые продуктами детонации зарядов в.в., не мешали сохранить электрическую изоляцию близлежащих лайнеров. Однако в случае, когда предоставляемый для размещения генераторов объем ограничен, требуется полная обтюрация продуктов детонации, что представляет собой более сложную задачу.

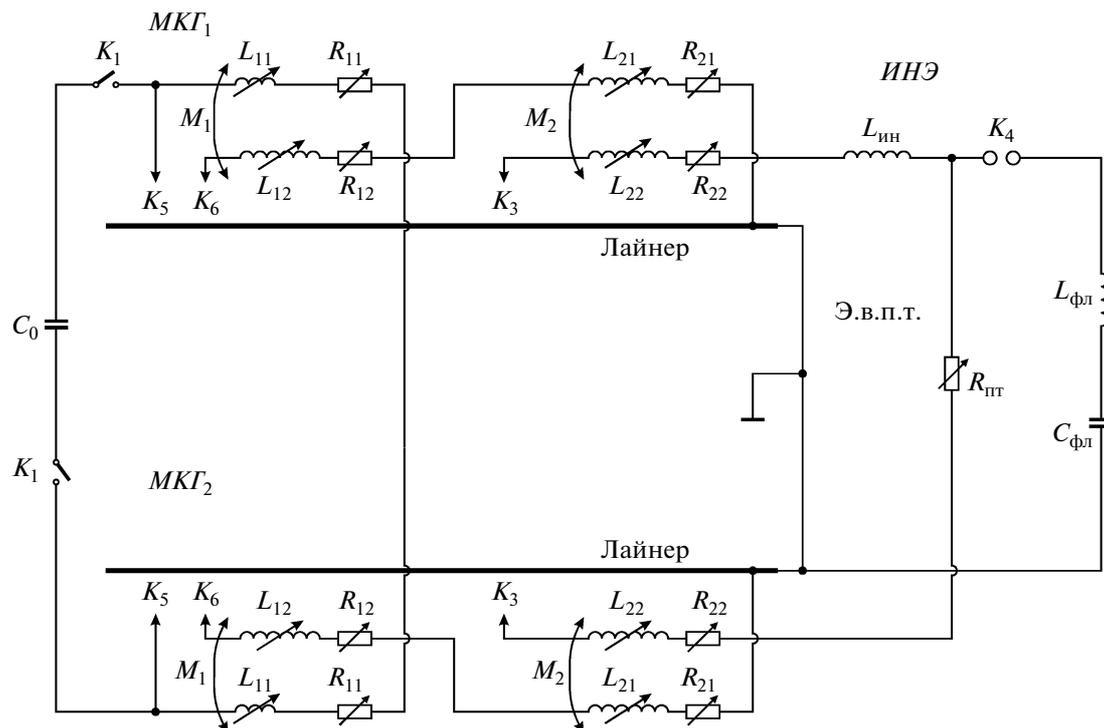


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема зарядки емкостной нагрузки с помощью двух двухкаскадных взрывных магнитокумулятивных генераторов с последовательно соединенными вторичными обмотками динамических трансформаторов.  $MKГ_1, MKГ_2$  – 2-каскадные магнитокумулятивные генераторы.

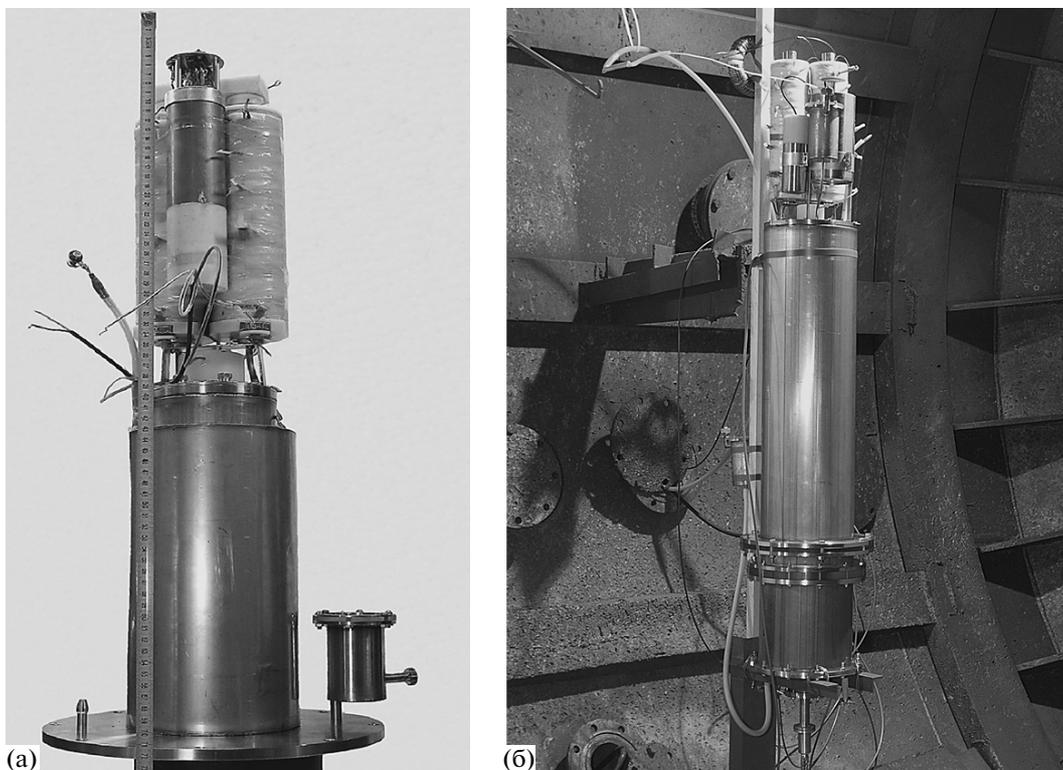


Рис. 9. Фотографии двух устройств наносекундной зарядки короткой формирующей линии, различающиеся габаритами и пиковыми напряжениями зарядки линии.

Таблица 2

Характеристики	Устройства зарядки короткой формирующей линии	
	рис. 9а	рис. 9б
Основные параметры устройств		
Диаметр рабочих спиралей двухкаскадных взрывных магнитокумулятивных генераторов, мм	57	71
Диаметр лайнера, мм	23	29
Длина лайнера, мм	250	300
Общая масса в.в., г	160	420
Результаты испытаний на индуктивную нагрузку		
Индуктивность нагрузки, мкГн	3.1	5.5
Начальная энергия, Дж	560	800
Максимальный ток в нагрузке, кА	60	72
Максимальная энергия в нагрузке, кДж	5.6	13
Максимальное напряжение на нагрузке, кВ	76	110
Эффективное время нарастания тока в нагрузке, мкс	2.12	2.27
Параметры индуктивного накопителя и э.в.п.т.		
Индуктивность индуктивного накопителя энергии, мкГ	6.6	5.5
Диаметр проволок электровзрывного прерывателя тока, мм	0.07	0.07
Число проволок электровзрывного прерывателя тока	18	36
Длина проволок электровзрывного прерывателя тока, мм	360	700
Максимальный ток в индуктивном накопителе энергии, кА	25.8	43
Пиковое напряжение на короткой формирующей линии, МВ	0.52	1.12
Максимальная энергия в нагрузке, кДж	0.27	1.25
Длина устройства зарядки короткой формирующей линии, м	0.6	1.0
Диаметр устройства зарядки короткой формирующей линии, м	0.15	0.2

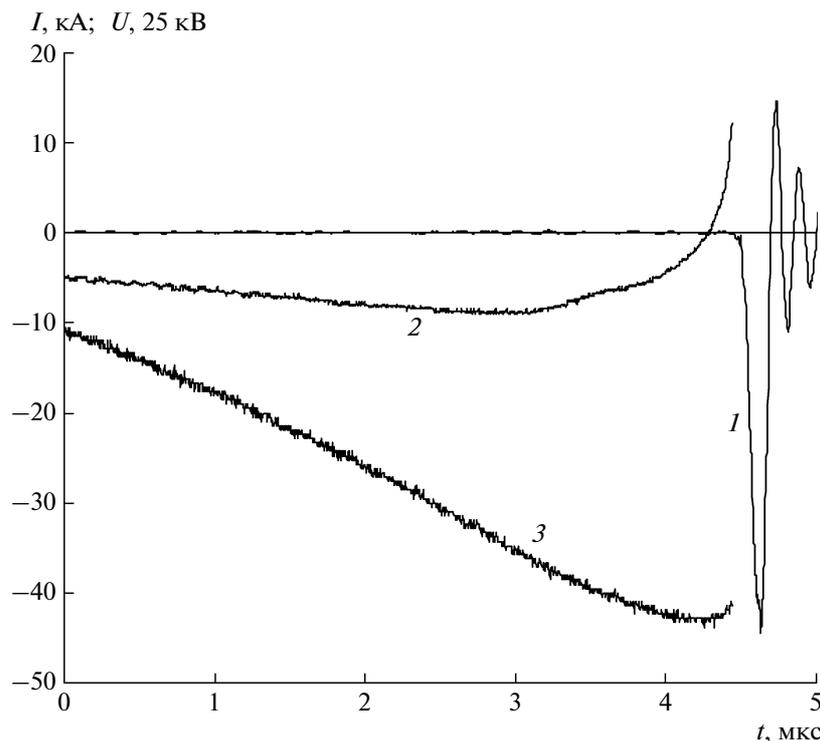
В работе [9] в многокаскадной системе фактически два динамических трансформатора были соединены своими вторичными обмотками в последовательную цепь с индуктивной нагрузкой, а деформация полостей обоих трансформаторов осуществлялась одним и тем же лайнером, заряд в.в. в котором инициировался с двух сторон.

Для сокращения длины устройства можно рассмотреть компоновку в виде двух одинакового размера двухкаскадных взрывных магнитокумулятивных генераторов с параллельными осями. При этом вторичные обмотки трансформаторных каскадов должны быть соединены в последовательную цепь с индуктивным накопителем энергии и э.в.п.т. В этом случае, используя трансформаторный способ введения начального магнит-

ного потока в предусилители обоих генераторов, как это показано на электрической схеме системы зарядки формирующей линии (рис. 8), можно реализовать эквипотенциальность обоих лайнеров. При этом минимальное расстояние между осями генераторов может быть равным их наружному диаметру.

На рис. 9 приведены фотографии двух устройств для наносекундной зарядки короткой формирующей линии, различающиеся габаритами и пиковыми напряжениями зарядки линии.

В табл. 2 сведены основные параметры устройств, представленных на рис. 9, некоторые результаты их испытаний на индуктивную нагрузку, отдельные параметры индуктивного накопителя и э.в.п.т., а



**Рис. 10.** Временные зависимости основных электрических параметров в эксперименте по зарядке короткой формирующей линии от двух соединенных двухкаскадных взрывных магнитокумулятивных генераторов в составе устройства на рис. 9б. 1 – напряжение зарядки формирующей линии, 2 – производная тока индуктивного накопителя, 3 – ток индуктивного накопителя.

также результаты одного из экспериментов по импульсной зарядке короткой формирующей линии.

На рис. 10 представлены временные зависимости основных электрических параметров, полученные в экспериментах с устройством на рис. 9б. Максимальное напряжение зарядки формирующей линии составило  $\geq 1$  МВ, ток индуктивного накопителя в момент пробоя разделяющего разрядника  $K_4$  (см. рис. 8) превысил 40 кА, время зарядки  $\sim 100$  нс. Общая масса заряда в.в. в двух генераторах составила  $< 400$  г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использования взрывных магнитокумулятивных генераторов с э.в.п.т. в схемах импульсной зарядки емкостных нагрузок – промежуточных и обостряющих емкостей, формирующих линий. Проведены практические испытания одной из перспективных схем зарядки с использованием динамического трансформатора. В экспериментах с взрывными магнитокумулятивными генераторами подтверждены выработанные применительно к индуктивно-емкостным источникам зарядки основные пути повышения эффективности передачи энергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коростелев А.Ф., Седой В.С., Лучинский А.В. // Изв. вузов. Физика. 1995. № 12. С. 45.
2. Азаркевич Е.И., Котов Ю.А. // Тез. докл. совместного заседания секций научных советов АН СССР “Научные основы электрофизики и электроэнергетики”. Томск: 1986. С. 111.
3. Борискин А.С., Бродский А.Я., Виноградов А.Б. и др. // Труды Седьмой международной конференции по генерации мегагауссных полей и родственным экспериментам. Саров: ВНИИЭФ, 1997. С. 288.
4. Дубицкий С.Д. ELCUT\_5.1-платформа разработки в приложении к анализу полей. EXPONENTA\_PRO (математика в приложениях). 2004. №1 (5). С. 20.
5. Chernyshev V.K., Zharinov E.I., Vaneev V.E. et al. Megagauss Fields and Pulsed Power Systems. / Ed. by V.M. Titov, G.A. Shvetsov. N.Y.: Nova Science Publ., 1990. P. 355.
6. Chernyshev V.K., Zharinov E.I., Kazakov S.A. et al. Megagauss Technology and Pulsed Power Systems. / Ed. by C.V. Fowler. N.Y., London: Plenum Press, 1987. P. 455.
7. Горбачев К.В., Нестеров Е.В., Петров В.Ю., Черных Е.В. // ПТЭ. 2009. № 1. С. 68.
8. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока. / Под ред. акад. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2002.
9. Lyudaev R.Z., Pavlovsky A.I., Yuryzev A.S. et al. Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications. /Ed. by Cowan M. and Spielman R. Inc. Part II. N.Y.: Nova Science Publishers, 1994. P. 619.