



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

**Р Ф Я Ц
ВНИИЭФ**

ИСТОЧНИК МЕГААМПЕРНОГО ТОКА С ВРЕМЕНЕМ НАРАСТАНИЯ ~ 100 НС НА БАЗЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

**А.А. Базанов, Е.И. Бочков, С.Г. Гаранин, П.В. Дудай, А.А. Зименков, А.В. Ивановский,
К.Н. Климушкин, В.М. Комаров, А.И. Краев, В.Б. Куделькин, В.И. Мамышев, И.В. Морозов
С.М. Полюшко, А.Н. Скобелев, З.С. Цибилов, Е.В. Шаповалов**

e-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

**Доклад на XIV международной конференции
«Забабахинские научные чтения»**

18-22 марта 2019 г.

Снежинск, Челябинской области, Россия

Для достижения порога термоядерного зажигания в схеме непрямого облучения рентгеновским излучением Z – пинча необходимо осуществить имплозию лайнера током амплитудой ~65 МА с временем нарастания ~ 100 нс [1].

В [2] предложена схема взрывного источника импульсной мощности на базе сверхмощного дискового ВМГ, способного осуществить имплозию Z – пинча током до 75 МА за время ~ 100 нс, формируемым двухкаскадной системой на базе электровзрывных фольговых размыкателей тока (ЭВФРТ) в виде «змейки» [3] и разрядника для развязки контура источника и нагрузки [4].

Отработку источника предполагается проводить поэтапно, наращивая величину тока. Ниже описаны принципы формирования токов с коротким временем нарастания (~100 нс) и результаты экспериментов по формированию тока:

амплитудой ~ 1 МА на установке с емкостными накопителями энергии КАСКАД;

амплитудой ~ 5 МА с применением спирального ВМГ (СВМГ) и взрывного размыкателя тока (ВРТ) в качестве первого каскада.

1. R.A. Vesey et al. Target design for high fusion yield with the double Z-pinch- driven hohlraum// Physics of Plasmas 14, 056302 (2007).
2. S.G. Garanin, A.V. Ivanovsky and L.S. Mkhitariyan An ICF system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator//Nuclear fusion Vol. 51, N 10, 2011.
3. V.K. Chernyshev, A.I. Kucherov, A.I. Mezhevov, V.V. Vakhrushev, 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Baltimore, Maryland, USA, P.1208 (1997).
4. A.V. Ivanovsky Explosive PW power current source – myth or reality? Proc. XIII Int. Conf. on Megagauss Magnetic Fields Generation and Relation Topics, Suzhou, 6-10 July 2010, P. 32/

1. Принципиальная схема обострения импульса тока

Классическая схема ЭВФРТ [5] приведена на рис. 1.

Для получения в нагрузке ~ 10 нГн тока с амплитудой $I_n \sim 100$ МА за время ~ 100 нс необходимо напряжение $V_n \sim 10$ МВ. ЭВФРТ эффективно работают при напряжённости электрического поля 5-10 кВ/см. То есть, длина фольги должна быть не менее $\ell \cong 10$ м.

Существующие технологии обеспечивают прочность изоляции над фольгой ~ 100 кВ/мм. То есть, необходима толщина диэлектрика не менее $d = 10$ см.

Индуктивность подвода энергии к нагрузке $L = \mu_0/2\pi \cdot \ell \cdot \ln(1+d/R) \cong 2$ нГ/см $\cdot \ell \cdot d/R$. При радиусе размещения фольги $R = 2$ м и напряжении $V_n \sim 10$ МВ, её величина не менее $L \cong 100$ нГн.



Рис. 1. Классическая схема ЭВФРТ.

Начальная индуктивность 15 элементного сверхмощного ДВМГ $L_0 = 360$ нГн. При усилении энергии K_E в ~ 15 раз с сохранением $\eta \sim 73\%$ от начального потока, конечная индуктивность оценивается $L_k \sim \eta^2 \cdot L_0 / K_E \sim 13$ нГн.

В силу $L \gg L_k$ применение классической схемы ЭВФРТ малоэффективно, а, фактически, бессмысленно. Как быть?

[5] А.А. Петрухин, В.В. Голубев, В.М. Данов и др. “Результаты экспериментов по передаче энергии мегаджоулевого диапазона из взрывомагнитного генератора с помощью фольгового размыкателя тока,” Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение, М.: Наука, pp. 384-387 (1984).

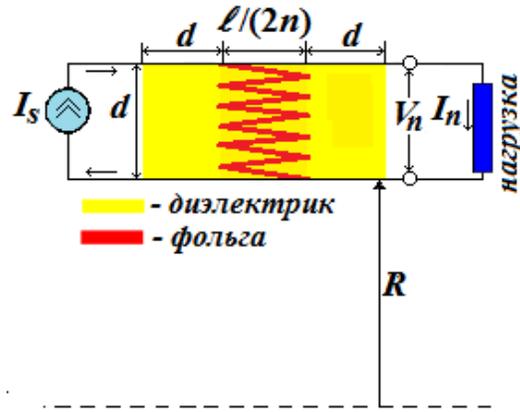


Рис. 2. Схема ЭВФРТ в виде «змейки».

Первая идея

В [3] рассмотрена схема ЭВФРТ в виде «змейки», представленная на рис. 2. В дальнейшем этот размыкатель предложено использовать совместно с ДВМГ для формирования импульсов тока микросекундной длительности [6].

В этой схеме индуктивность над фольгой определяется из $L = \mu_0/2\pi(\ell/(4n)+d)\cdot\ln(1+d/R)$. При тех же параметрах $\ell=10$ м, $d=10$ см, $R=2$ м и, например, $n=20$ индуктивность составит $L=2.2$ нГн.

Для иллюстрации эффективности обострения были проведены расчёты тока в нагрузке при работе источника на основе СВМГ $\varnothing 240$ мм с ВРТ на ЭВФРТ в виде «змейки». На момент срабатывания ВРТ индуктивность контура СВМГ составляет $L_G = 47.3$ нГн, ток в цепи генератора $I_G = 12.8$ МА.

Схема этого источника представлена на рис. 3 а), рассчитанные и регистрируемые в опытах токи при работе на индуктивную нагрузку $L_v = 20$ нГн сравниваются на рис. 3 б).

[3]. V.K. Chernyshev, A.I. Kucherov, A.I. Mezhevov, V.V. Vakhrushev, 11th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Baltimore, Maryland, USA, P.1208 (1997).

[6] В.К. Чернышёв, В.В. Вахрушев, А.В. Ивановский, В.Б. Куделькин и др., VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии, Саров, P. 563 (2006).

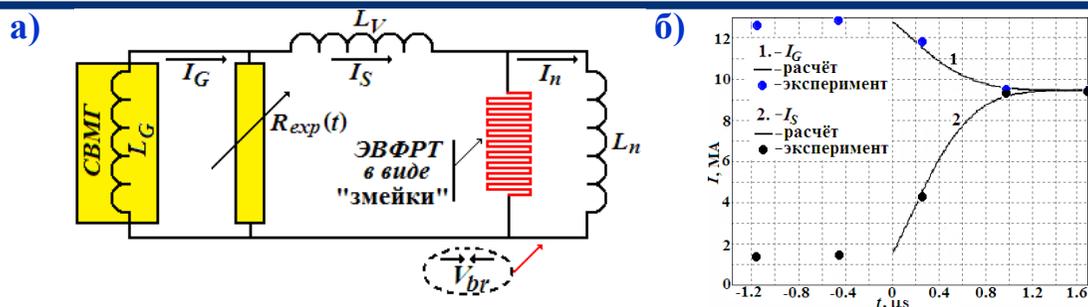


Рис. 3. Источник тока на основе СВМГ \varnothing 240 мм и взрывного размыкателя тока:
а) схема; б) сравнение результатов расчётов и экспериментальных данных при индуктивной нагрузке $L_V = 20$ нГн.

На рис. 4а) приведены расчётные временные зависимости токов и напряжений на ЭВФРТ в виде «змейки» (длина фольги $\ell = 0.6$ м, толщина $\delta = 12$ мкм) при работе с источником тока рис. 3. Напряжение на фольге ~ 70 кВ и эффективного обострения тока не наблюдается.

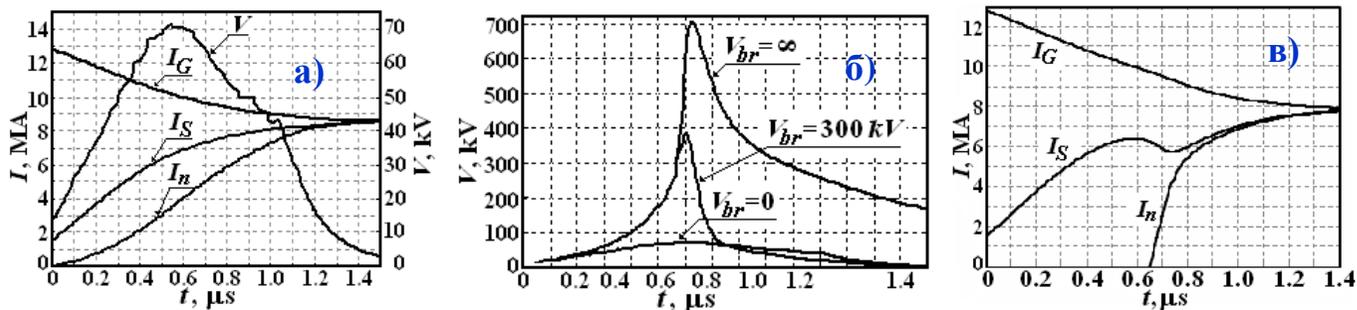


Рис. 4. Расчётные зависимости от времени ($L_n = 7.5$ нГн):
а)- токи и напряжения;
б) - напряжения при различных V_{br} ;
в) – токи при $V_{br} = 300$ кВ.

С другой стороны, расчёт с разорванной цепью «ЭВФРТ – нагрузка» ($L_n = \infty$, рис. 3 а) показал, что напряжение на фольге достигает ~ 700 кВ (рис. 4 б), кривая $V_{br} = \infty$).

Вторая идея

«Развязать» ЭВФРТ и нагрузку на стадии электровзрыва разрядником (см. рис. 3а). Результаты расчётов с разрядником, срабатывающим при напряжении $V_{br} = 300$ кВ, представлены на рис. 4 б), в). Напряжение на ЭВФРТ в виде «змейки» ~ 400 кВ, ток в нагрузке – 5 МА за 130 нс.

2. Первые эксперименты

Экспериментальное устройство (рис. 5 а) состоит из СВМГ Ø 240 мм, ВРТ Ø 300 мм, ЭВФРТ в виде «змейки» (рис. 5 б)), проходного диэлектрика, вакуумного разрядника-обострителя (рис. 5 в) и жесткой нагрузки. Вакуумные малоиндуктивные разрядники, коммутирующие импульсы тока при мегавольтных напряжениях за время < 10 нс, были разработаны по программе БАЙКАЛ [7].

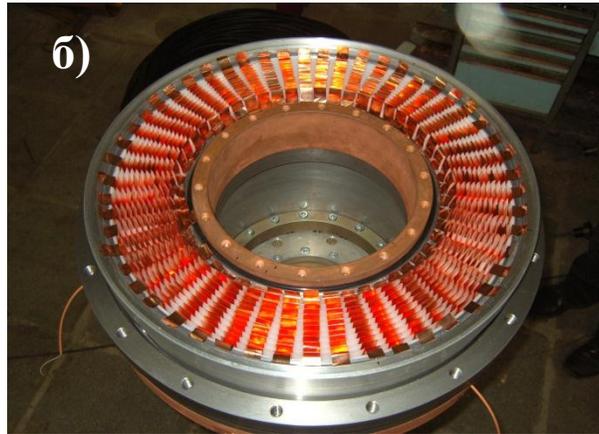


Рис. 5. Общий вид : экспериментального устройства –а); ЭВФРТ в виде «змейки» - б); вакуумного разрядника - обострителя - в).

Первый опыт был проведен в 2011 году. В нем была получена вся запланированная экспериментальная информация. Источник импульсной мощности на основе СВМГ и ВРТ сработал в расчетном режиме.

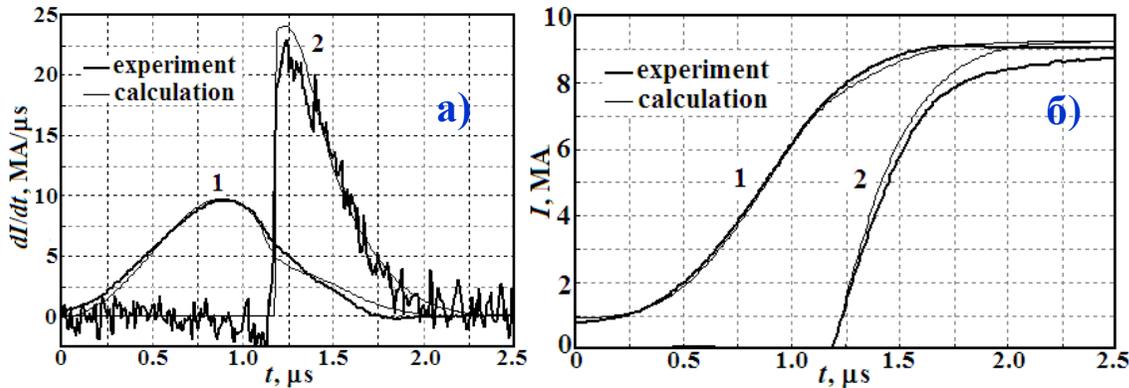


Рис. 6. Зарегистрированные в опыте и рассчитанные: производные тока от времени – а); ток от времени – б) (1 - цепь источника $-I_s$, 2 - цепь нагрузки $-I_n$ (твердый диэлектрик)).

Сравнение зарегистрированных в опыте и расчетных производных тока (dI_s/dt) и тока (I_s) в цепи источника (после ВРТ) представлено на рис. 6. Там же приведены токи в цепи нагрузки, зарегистрированные в твердом диэлектрике. Амплитуда тока 5 МА достигнута за время ~ 250 нс.

Датчики в вакуумной полости сигналов не зарегистрировали - разрядник не сработал.

В опыте имел место пробой в цепи нагрузки с образованием токового контура до разрядника. При анализе будем считать, что пробой произошел при напряжении на ЭВФРТ

$$V_{br} \approx L_{br} \cdot (dI/dt)_{max} ,$$

где $(dI/dt)_{max} = 2.3 \cdot 10^{13}$ А/с - зарегистрированная максимальная производная тока, L_{br} - индуктивность образовавшегося токового контура.

Расчеты и эксперименты согласуются при $L_{br} \approx 3$ нГн ($V_{br} \approx 70$ кВ), что соответствует пробую по поверхности проходного диэлектрика.

В последующем эксперименты с ЭВФРТ проводились на установке КАСКАД с емкостными накопителями энергии. Картина аналогична – проходной изолятор пробивался при напряжении $V_{br} \approx 20$ кВ. Поднять стойкость изоляции путем совершенствования конструкции не удалось.

Третья идея

В схеме с вакуумным разрядником (см. рис. 7) высокое напряжение на проходном изоляторе появляется до срабатывания разрядника и появления тока (магнитного поля) в нагрузке.

Было решено заменить вакуумный разрядник на твердотельный. При этом напряжение и ток появляются одновременно, обеспечивая режим магнитной изоляции, что типично для установок с емкостными накопителями энергии.

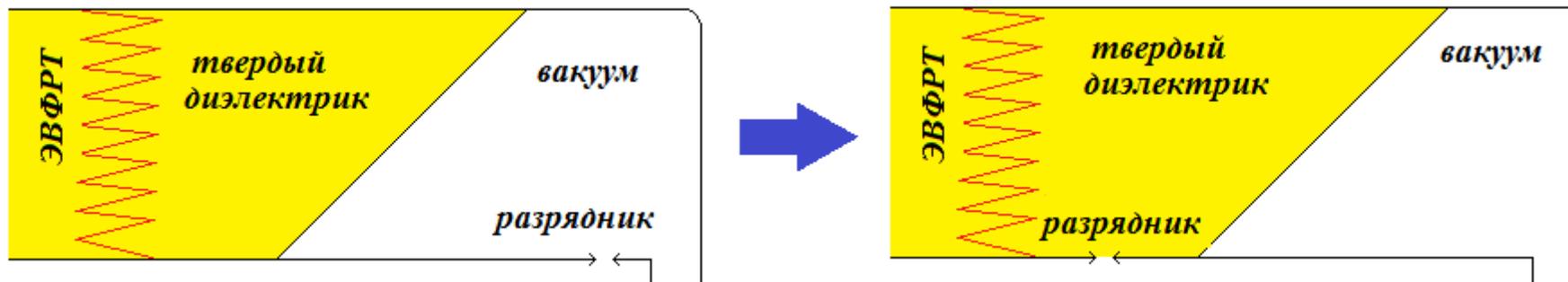


Рис. 7. Схемы перехода «диэлектрик – вакуум»: вакуумный разрядником – а); твердотельный разрядник – б).

Проверка работоспособности схемы с твердотельным разрядником были выполнена на установке КАСКАД. Для упрощения опытов конструкция ЭВФРТ была без вакуумной полости. Параметры фольги: высота $\ell = 60$ см; толщина $\delta = 15$ мкм; ширина $h = 32$ см (32 полосы по 1 см).

Эксперименты проводились сериями по два опыта:

- первый без разрядника, напряжение на ЭВФРТ определялось из $V = L_n \cdot dI_n/dt$ ($L_n = 90$ нГн);
- во втором устанавливался разрядник с $V_{br} \sim 100$ кВ, индуктивность нагрузки $L_n = 8.5$ нГн.

Типичные результаты одной из серий опытов на установке КАСКАД представлены на рис. 8: напряжение на ЭВФРТ составило ~ 150 кВ; в нагрузке реализован ток ~ 0.7 МА за время ~ 120 нс.

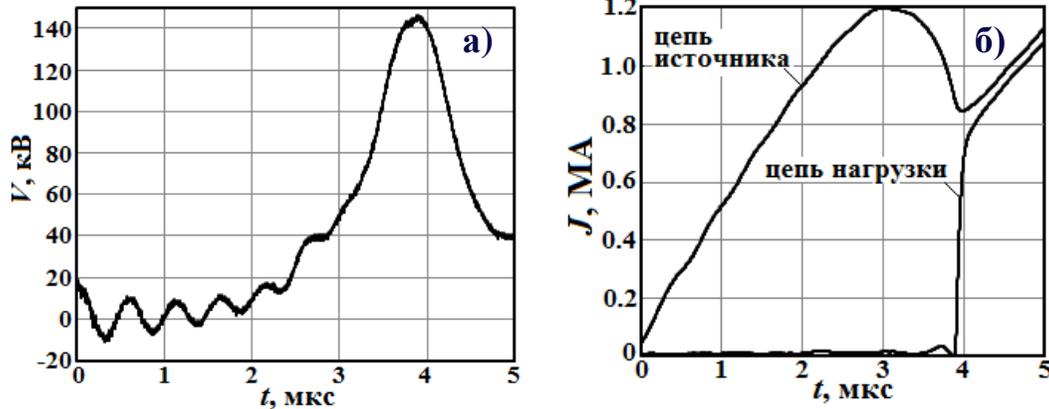


Рис. 8. Зависимости от времени:

- напряжения на индуктивной нагрузке в первом опыте серии – а);
- токов в цепи источника и нагрузки во втором опыте серии – б).

В серии опытов с СВМГ $\varnothing 240$ мм ширина фольги была увеличена до 80 см. В первом опыте индуктивность нагрузки $L = 50$ нГн. Во втором - установлен разрядник с $V_{br} = 300$ кВ (по статике), индуктивность нагрузки - $L = 9$ нГн. На рис. 9 сравниваются расчетные и экспериментальные кривые.

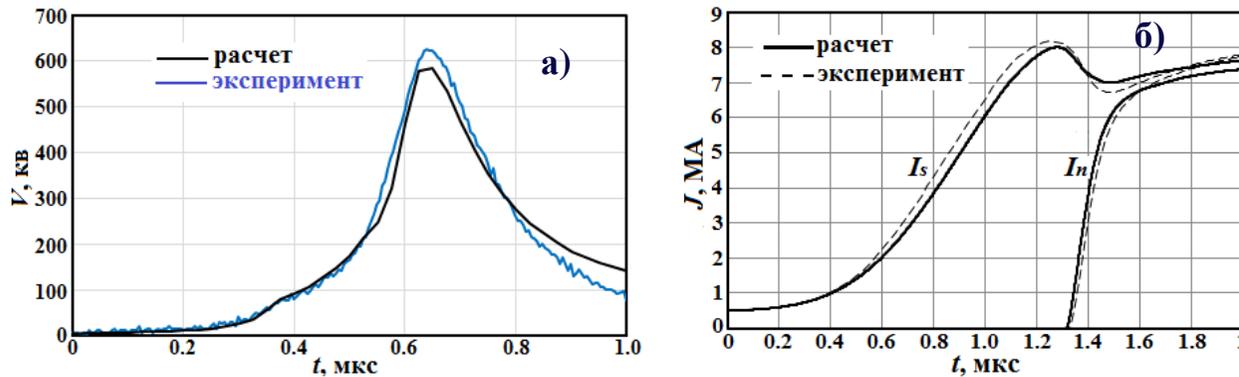


Рис. 9. Зависимости от времени:

- напряжения на нагрузке в первом опыте с СВМГ $\varnothing 240$ мм – а);
- токов в цепи источника и нагрузки во втором опыте с СВМГ $\varnothing 240$ мм – б).

Напряжение на фольге составило ~ 600 кВ, ток в нагрузке достиг ~ 5 МА за время ~ 120 нс.

Перспективы



Внешний вид СВМГ



Внешний вид установки АНГАРА-5-1 (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)

