

ВЗРЫВОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ Z - ПИНЧА

С. Г. Гаранин, А. В. Ивановский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.

Приведена и обоснована схема устройства на базе сверхмощного дискового взрывомагнитного генератора для реализации импульса рентгеновского излучения с энергией, превышающей порог зажигания мишени.

Введение

Для осуществления термоядерного зажигания в схемах с инерционным удержанием необходимо создать высокую плотность энергии. Наиболее подходящими установками для этого являются лазерные установки, на которых достаточно легко реализуются температуры рентгеновского излучения (РИ) $T_r \approx 300$ эВ. При этом достижимый в настоящее время уровень энергии в импульсе РИ составляет ≈ 2 МДж (проводятся исследования на установке NIF в США, заканчивается строительство установки «Мегаджоуль» во Франции, начато строительство установки мегаджоульного уровня в России).

Эксперименты в Сандийских национальных лабораториях США, в ходе которых на установке Z получен импульс РИ длительностью ≈ 5 нс с энергией $\approx 1,8$ МДж [1], показали, что электрофизические установки, способные создавать кратковременный (100–200 нс) импульс тока с амплитудой более 10 МА, могут генерировать мощное РИ. Поскольку у этих установок эффективность использования электрической энергии конденсаторной батареи больше, чем у лазеров, они производят более мощное РИ. Так, энергия в импульсе РИ установки Z близка к энергии в импульсе лазерной установки NIF. Однако на лазерных установках плотность энергии более чем на порядок выше. Поэтому для реализации термоядерного зажигания требуются установки с мощностью на порядок большей Z.

Возможно, наиболее быстрым и экономичным путем реализации условий зажигания на электрофизических установках является использование дисковых взрывомагнитных генераторов (ДВМГ) [2–4], работающих на принципе преобразования энергии взрывчатого вещества (ВВ) в энергию

магнитного поля. Возможность создания такой установки рассмотрена в [5]. В работе приведена и обоснована схема устройства на базе сверхмощного ДВМГ, позволяющего превысить порог зажигания по подводимой к мишени энергии РИ в два раза. Рассмотрена возможность поэтапной реализации такой установки: ДВМГ малого класса; ДВМГ среднего класса; сверхмощный ДВМГ.

Условия зажигания мишени.

По существующим представлениям для достижения порога зажигания мишени необходимо создание двумя Z – пинчами РИ с уровнем энергии $2 \cdot E_0 = 20$ МДж (по $E_0 = 10$ МДж в каждом) за время ≤ 5 нс [6]. Для создания такого РИ необходимо реализовать имплозию Z – пинча током 65 МА за время ~ 100 нс. В России начато строительство мощной электрофизической установки «Байкал» на базе конденсаторной батареи с энергоемкостью ≈ 50 МДж. На установке планируется осуществлять имплозию Z-пинча током до 50 МА за время ≈ 150 нс с энергией импульса РИ до 10 МДж.

Схема установки на базе ДВМГ

Схема установки для реализации зажигания приведена на рис. 1. В табл. 1 приведены параметры ДВМГ (D и m – диаметр и масса ВВ дискового элемента; L_0 – начальная индуктивность на один дисковый элемент; I_0 – начальный ток; E_{EMG} – энергия магнитного поля, генерируемая одним дисковым элементом; τ_{ef} – эффективное время компрессии потока).

На практике применяют ДВМГ в составе до 30 дисковых элементов – общая энергия генерируемого магнитного поля может достичь 1,2 ГДж за время 12 мкс.

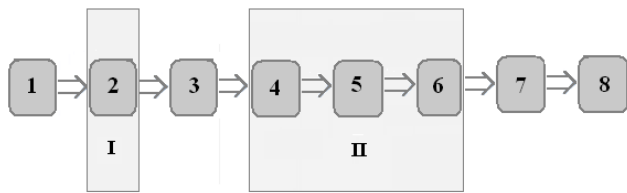


Рис. 1. Схема установки: 1 – ДВМГ; 2, 4 – обострители тока; 3 – индуктивный накопитель; 5 – проходной изолятор; 6 – вакуумный разрядник; 7 – вакуумная волновая линия; 8 – Z-пинч; I, II – первый и второй каскады обострения тока

Таблица 1

Параметры ДВМГ [5]

	D , м	m , кг	L_0 , нГн	I_0 , МА	E_{EMG} , МДж	τ_{ef} , мкс
ДВМГ малого класса	0,25	0,9	6	6,5	0,8	4,0
ДВМГ среднего класса	0,40	3,3	12	7,0	3,0	6,5
Сверхмощный ДВМГ	1,0	36	24	14	40	12

При коммутации тока из индуктивного накопителя в индуктивную нагрузку передается 1/4 запасенной энергии (ток делится пополам). При использовании 30-элементного сверхмощного ДВМГ после прохождения двух каскадов происходит обострение тока на порядок, в результате чего к Z-пинчу подводится электромагнитная энергия $E_n \approx 75$ МДж за время ≈ 100 нс. При индуктивности подвода энергии к Z-пинчу $L_n \approx 15$ нГн ток составит $I_n \approx 100$ МА ($E = I^2/2$).

Для подвода энергии ДВМГ к нагрузке за время ≈ 1 мкс применяют электровзрывные фольговые размыкатели тока (ФРТ) 2 (см. рис. 1). В качестве материала фольги используют медь. Параметры тока определяют из расчетов в одномерном МГД-приближении [7]. Хорошее согласие результатов расчетов и экспериментальных данных наблюдается при проводимости σ (ρ , ϵ) и уравнения состояния меди p (ρ , ϵ) из работы [8] и уравнений состояния лавсановой изоляции в форме Ми – Грюнайзена [9].

Применение классической схемы ФРТ с фольгой, расположенной вдоль цилиндрической поверхности, во втором каскаде обострения тока (см. рис. 1) невозможно. Для получения тока $I_n \approx 100$ МА в Z-пинчевой нагрузке $L_n \approx 10$ нГн за время $t \approx 100$ нс необходимо напряжение $V_n \approx 10$ МВ. При существующих технологиях удержание такого напряжения в классической схеме ФРТ возможно при индуктивности волновой линии над фольгой ≥ 100 нГн, что заметно

превосходит предполагаемую индуктивность Z-пинча. В работе [10] для получения напряжений в нагрузке ~ 10 МВ предложено использовать малоиндуктивный электровзрывной размыкатель тока в виде змейки [11]. Для змейки из n звеньев индуктивность уменьшается в $2n$ раз. Таким образом, в описанных условиях при $n = 20$ индуктивность составит $\sim 2,5$ нГн.

Проходные изоляторы 5 (см. рис. 1) широко применяются в электрофизических установках при формировании импульсов тока в нагрузке с временем нарастания ~ 100 нс («Ангара», PTS, Z и т.д.). Существующие технологии позволяют обеспечить электропрочность на уровне 8–9 МВ/м при индуктивности изолятора, составляющей несколько наногенри.

Для формирования импульсов тока длительностью ~ 100 нс необходима развязка цепи источника и нагрузки на стадии электровзрыва [10]. С этой целью во втором каскаде обострения тока используют вакуумный разрядник 6 (см. рис. 1). Вакуумные малоиндуктивные разрядники для коммутации тока при за время $t < 10$ нс, разработаны по программе «Байкал» [12].

Возможность подвода электромагнитной энергии к Z-пинчу по вакуумной волновой линии 7 (см. рис. 1) при плотности тока ≈ 700 МА/м показана в [13].

Первый каскад обострения тока.

Схема представлена на рис. 2. Начальный ток в контуре ДВМГ создается спиральным ВМГ. Все заряды ВВ дисковых элементов в ДВМГ инициируются одновременно. Под действием продуктов взрыва соседние диски схлопываются, выводя магнитный поток в волновую линию. В результате нарастания тока происходят электровзрыв фольги и срабатывание взрывного ключа К. При этом магнитная энергия поступает в индуктивный накопитель.

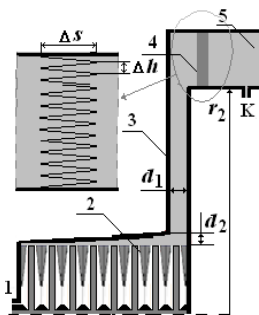


Рис. 2. Схема первого каскада обострения тока: 1 – спиральный ВМГ; 2 – ДВМГ, включающий 30 элементов; 3 – волновая линия; 4 – фольга в виде змейки; 5 – индуктивный накопитель; К – взрывной замыкающий ключ

Существующие технологии позволяют реализовать электровзрывной размыкатель в виде змейки с отношением ширины звена Δs к его высоте Δh , равным 5, и отношением длины фольги к общей высоте змейки, равным 10.

При проведении расчетов считалось, что индуктивности L_W и L_{ind} волновой линии и индуктивного накопителя для всех классов ДВМГ составляют 10 и 15 нГн, соответственно. Длина ℓ_f и толщина фольги δ варьировались.

Анализ результатов расчетов показал, что при всех длинах фольги ℓ_f максимальные ток в индуктивном накопителе и напряжение на фольге реализуются при $\delta = 40$ мкм. Эта толщина фольги является оптимальной.

В табл. 2 приведены максимальные значения напряжения на фольге V_{max} , тока в индуктивном накопителе I_{max} и длины фольги ℓ_{max} для 30-элементных ДВМГ.

Таблица 2
Максимальные значения напряжения, тока и длины фольги для различных классов ДВМГ

	ℓ_{max} , м	V_{max} , МВ	I_{max} , МА
ДВМГ малого класса	1,0	0,40	22
ДВМГ среднего класса	2,4	0,96	59
Сверхмощный ДВМГ	8,0	2,80	370

Следует отметить, что принятая при проведении расчетов индуктивность волновой линии $L_W = 10$ нГн обеспечивается путем подбора толщин d_1 и d_2 (см. рис. 2). При этом максимальная напряженность электрического поля в диэлектрике волновой линии не превышает 50 кВ/мм для ДВМГ малого класса и 100 кВ/мм для ДВМГ среднего класса и сверхмощного ДВМГ.

Второй каскад обострения тока.

Расчетная оптимизация параметров фольги для ДВМГ малого класса проводилась при работе источника тока на индуктивную нагрузку $L_V = 10$ нГн. Сопротивление вакуумного разрядника R_{dich} считалось бесконечным и принималось равным нулю при достижении напряжением пробойного значения V_{br} , которое выбиралось из следующих соображений. Ток Z-пинча I_p оценивается из $I_p \sim I_{ind} \cdot L_{ind} / (L_{ind} + L_V) \approx 12$ МА. Для переброса такого тока в нагрузку за время $\Delta t \approx 100$ нс необходим разрядник с $V_{br} \sim L_V \cdot I_p / \Delta t \approx 1,2$ МВ.

Анализ расчетов показал, что максимальное напряжение $\approx 1,5$ МВ и минимальное время нарастания тока реализуются при $\ell_f = 2,5$ м и $\delta = 8$ мкм.

Второй каскад целесообразно строить по модульному принципу (рис. 3).

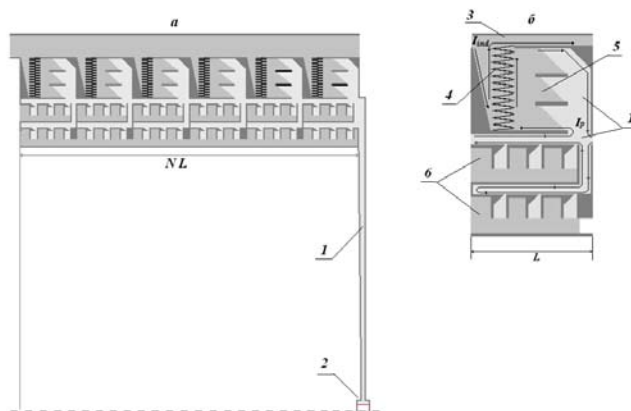


Рис. 3. Схема второго каскада обострения тока: а — каскад; б — модуль каскада; 1 — вакуумная волновая линия, 2 — Z-пинч, 3 — индуктивный накопитель, 4 — электровзрывной размыкатель тока, 5 — проходной изолятор, 6 — вакуумный разрядник, стрелки — направление тока

Каждый модуль содержит обостритель тока в виде змейки, проходной изолятор, вакуумные разрядники и рассчитан на напряжение $\approx 1,5$ МВ. При этом напряженность электрического поля по поверхности проходного изолятора ≤ 6 кВ/мм, напряженность пробойного поля вакуумного разрядника $\sim 1,2$ МВ. Будем считать, что ширина зазора подводящей энергию к Z-пинчу волновой линии уменьшается с 10 мм до 5 мм.

Для указанных параметров в табл. 3 приведены значения индуктивности одного модуля обострения тока L_1 и волновой линии для подвода энергии к Z-пинчу L_2 при различных радиусах r_2 размещения фольги. Полная индуктивность подвода энергии к Z-пинчу определяется из $L_V = N \cdot L_1 + L_2$. Для ДВМГ малого класса $N=1$, $r_2=0,5$ м.

Таблица 3
Индуктивность одного модуля обострения тока и вакуумной волновой линии в зависимости от радиуса размещения фольга

r_2 , м	L_1 , нГн	L_2 , нГн
0,5	5,2	5,2
0,8	3,6	5,7
3,0	1,1	7,1

Таблица 4

Оптимальные толщины фольги δ и количество модулей

ДВМГ	δ , мкм	N^*
ДВМГ малого класса	8	1
ДВМГ среднего класса	15	4
сверхмощный ДВМГ	20	10

В табл. 4 приведены полученные в расчетах оптимальные толщины фольги δ , обеспечивающие максимальные напряжения на втором каскаде обострения тока, а также количество модулей N^* , необходимое для достижения этого напряжения.

Имплозия Z-пинча.

При проведении расчетов индуктивность Z-пинча определялась из $L_p(t) = \frac{\mu_0 z_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_0}{r(t)}$. Здесь $z_0 = 20$ мм, $r_0 = 15$ мм – высота и начальный радиус Z-пинча; $r(t)$ – текущий радиус, определяемый из уравнений $\frac{dr}{dt} = v$, $\frac{dv}{dt} = -\frac{\mu_0 z_0}{4\pi} \cdot \frac{I_p^2}{m_Z r}$, где m_Z – масса Z-пинча. Начальные условия имеют вид $r|_{t=0} = r_0$, $v|_{t=0} = 0$.

Расчеты проводились до момента времени имплозии Z-пинча в десять раз. В расчетах варьировались количество модулей второго каскада обострения тока N и масса Z-пинча m_Z . При малых массах Z-пинча мала кинетическая энергия, при больших массах – скорость, а следовательно, и эффективность преобразования кинетической энергии Z-пинча в энергию рентгеновского излучения. Считалось, что масса m_Z оптимальна, если время имплозии составляет порядка 100 нс.

На рис. 4 представлены зависимости токов и напряжения на обострителе тока в виде змейки от времени для ДВМГ среднего класса при $N = 4$ и массе Z-пинча $m_Z = 14,5$ мг, обеспечивающей оптимальные условия имплозии. Время имплозии составило ≈ 120 нс, кинетическая энергия Z-пинча $\approx 2,6$ МДж.

В табл. 5 приведены значения тока I_p и кинетической энергии E_k при имплозии Z-пинчей в оптимальных условиях в зависимости от количества модулей N . Параметры источника тока на базе ДВМГ малого класса аналогичны параметрам установки PTS, на базе ДВМГ среднего класса – параметрам установки Z. Источник тока на базе сверхмощного ДВМГ способен осуществить имп-

лозию Z-пинча при токе 90 МА за время ≈ 100 нс, при этом энергия РИ в два раза больше необходимой для достижения порога зажигания мишени.

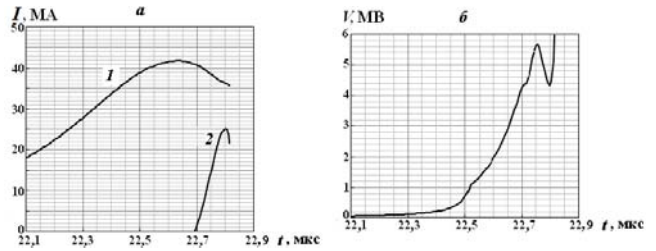


Рис. 4. Зависимости токов (а) и напряжения (б) на обострителе тока в виде змейки от времени для ДВМГ среднего класса при $N = 4$, $m_Z = 14,5$ мг

Таблица 5

Значения тока и кинетической энергии при имплозии Z-пинча

N	ДВМГ малого класса		ДВМГ среднего класса		Сверхмощный ДВМГ	
	I_p , МА	E_k , МДж	I_p , МА	E_k , МДж	I_p , МА	E_k , МДж
1	10	0,36	16	1,0	18	1,0
2	-	-	21	1,8	32	3,5
3	-	-	24	2,3	42	7,0
4	-	-	26	2,7	50	10,0
5	-	-	27	3,0	57	13,0
6	-	-	-	-	63	16,0
8	-	-	-	-	72	21,0
10	-	-	-	-	79	25,0
12	-	-	-	-	84	28,0
14	-	-	-	-	90	33,0

Заключение

Показана возможность имплозии Z-пинча током 90 МА за время ≈ 120 нс с применением сверхмощных ДВМГ. Энергия РИ ≈ 40 МДж в два раза превысит необходимую для достижения порога зажигания мишени.

Предлагаемую взрывную установку целесообразно реализовывать параллельно созданию установки «Байкал». Многократное повторение лабораторных пусков на электрофизических установках «Ангара» (Россия), PTS (Китай), Z (США), «Байкал» (Россия), а также на лазерных установках позволит тщательно подготовить полигонные эксперименты со сверхмощными ДВМГ.

Технологию формирования импульсов тока с временем нарастания ≈ 100 нс можно разработать поэтапно с использованием ДВМГ малого класса (ток ≈ 10 МА) и ДВМГ среднего класса (ток ≈ 25 МА).

Список литературы

1. Desjarlais M. P., Marder B. M. Theory of wire number scaling in wire-array Z-pinches // *Phys. Plasmas*. 1999. V. 6, N 5, P. 2057–2064.
2. Chernyshev V. K., Demidov V. A., Grinevich B. Ye., et al. Fast-operating disk EMG using planar disks // *Proc. of the 6th Megagauss magnetic field generation and pulsed power application (MG-VI)*. N. Y.: Nova Sci. Publ., Albuquerque. November 8–11. 1994. P.547–556.
3. Chernyshev V. K., Vakhrushev V. V., Shpagin V. I., et al. Small class ($\varnothing 250$ mm) disk EMG testing results // *Proc. of the 28th IEEE Intern. conf. on plasma science and 13th IEEE Intern. pulsed power conf. IEEE, Las Vegas. June 17–22. 2001. P. 971–973.*
4. Чернышев В. К., Вахрушев В. В., Мамышев В. И. Обоснование возможности создания нового (второго) поколения сверхмощных взрывомагнитных источников энергии дискового типа с коэффициентом полезного действия вдвое превышающим достигнутый уровень // *Гидродинамика высоких плотностей энергии. Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2004. С. 224–228.*
5. Garanin S. G., Ivanovsky A. V., Mkhitarian L. S. An ICE system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator // *Nuclear Fusion*. 2011. V. 51. 103010.
6. Vesey R. A., Herrmann M. C., Lemke R. M., et al. Target design for high fusion yield with the double Z-pinch- driven hohlraum // *Physics of Plasmas*. 2007. V. 14. N 4, 056302.
7. Буйко А. М., Данов В. М., Мамышев В. И. и др. Методика численного моделирования дисковых взрывомагнитных генераторов с электро-взрывным обострителем тока и лайнерной нагрузкой // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов*. 1995. Вып. 4. С. 12–17.
8. Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В. Магнитогидродинамический расчёт взрывающихся проводников // *Журн. техн. физики*. 1976. Т. 46, в.9. С. 1963–1969.
9. Физика взрыва / Под ред. Ю. П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
10. Ивановский А. В. Взрывной источник тока РВ-мощности – миф или реальность? // *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров.: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»*. 2013. Вып. 18. С. 236–246.
11. Chernyshev V. K., Kucherov A. I., Mezhevov A. I., et al. Electroexplosive Foil 500 kV current opening switch characteristics research // *Proc. 11th IEEE Intern. Pulsed power conf., Baltimore.: Naval Research Laboratory. Baltimore June 29-July 2. 1997. P. 1208–1212.*
12. Долгачёв Г. И., Масленников Д. Д., Ушаков А. Г. и др. Исследование электрической прочности вакуумного промежутка при пробое в неоднородном электрическом поле для коммутации мощных импульсов // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 2. С. 1–11.
13. Данько С. А. Особенности динамики плазмы и генерация рентгеновского излучения в экспериментах с мегаамперными z-пинчами: Дис. д-ра физ.-мат. наук. М., 2012.
14. Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В. Магнитогидродинамический расчёт взрывающихся проводников // *Журн. техн. физики*. 1976. Т. 46, в.9. С. 1963–1969.
15. Физика взрыва / Под ред. Ю. П. Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
16. Ивановский А. В. Взрывной источник тока РВ-мощности – миф или реальность? // *Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров.: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»*. 2013. Вып. 18. С. 236–246.
17. Chernyshev V. K., Kucherov A. I., Mezhevov A. I., et al. Electroexplosive Foil 500 kV current opening switch characteristics research // *Proc. 11th IEEE Intern. Pulsed power conf., Baltimore.: Naval Research Laboratory. Baltimore June 29-July 2. 1997. P. 1208-1212.*
18. Долгачёв Г. И., Масленников Д. Д., Ушаков А. Г. и др. Исследование электрической прочности вакуумного промежутка при пробое в неоднородном электрическом поле для коммутации мощных импульсов // *Приборы и техника эксперимента*. 2007. № 2. С. 1–11.