

УДК 621.039.571; 539.1.084

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

С. Г. Гаранин, А. В. Ивановский

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия
E-mails: garanin@otd13.vniief.ru, ivanovsky@elph.vniief.ru

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

Ключевые слова: зажигание термоядерной мишени, Z-пинч, рентгеновское излучение, дисковый взрывомагнитный генератор, электровзрывной размыкатель тока, высоковольтные вакуумные разрядники.

Введение. Для осуществления термоядерного зажигания в схемах с инерционным удержанием необходимо создать высокую плотность энергии. Наиболее подходящими установками для этого являются лазерные установки, способные создавать высокую концентрацию энергии. На лазерных установках 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 ток с временем нарастания 100–200 нс и 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 импульса РИ установки Z близка к энергии импульса лазерной установки NIF. Однако в лазерных установках плотность энергии более чем на порядок выше. Поэтому для реализации термоядерного зажигания требуются установки, мощность которых на порядок больше мощности установки Z.

В России начато строительство электрофизической установки “Байкал” на базе конденсаторной батареи с энергоемкостью ≈ 50 МДж. На этой установке планируется осуществлять имплозию Z-пинча током 50 МА за время ≈ 150 нс с энергией импульса РИ до 10 МДж. Однако в наиболее хорошо проработанной схеме на основе двухпинчевого вакуумного хольраума порог зажигания достигается при токе 65 МА и энергии импульса РИ 20 МДж [2].

Возможно, наиболее быстрым и экономичным способом реализации условий зажигания на электрофизических установках является использование дисковых взрывомагнитных генераторов (ДВМГ) [3–5], принцип работы которых основан на преобразовании энергии взрывчатого вещества (ВВ) в энергию магнитного поля. Возможность создания такой установки рассмотрена в [6]. В настоящей работе приведена и обоснована схема устройства на базе сверхмощного ДВМГ, позволяющего реализовать условия, при которых порог зажигания по подводимой к мишени энергии РИ может быть превышен в два раза. Рассмотрена возможность реализации таких установок с последовательным наращиванием мощности ДВМГ (ДВМГ малого класса, ДВМГ среднего класса, сверхмощный ДВМГ).

Предлагаемую взрывную установку целесообразно использовать, продолжая работы по 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.

Схема установки. Схема предлагаемой установки для осуществления зажигания приведена на рис. 1. Основу установки составляют ДВМГ. В табл. 1 приведены параметры разработанных ДВМГ (D — диаметр дискового элемента; m — масса ВВ в дисковом элементе; L_0 — начальная индуктивность, приходящаяся на один дисковый элемент; I_0 — начальный ток; $E_{\text{ЕМГ}}$ — энергия магнитного поля, генерируемая одним дисковым элементом; τ_{eff} — эффективное время компрессии потока).

На практике применяются ДВМГ, включающие до 30 дисковых элементов. Общая энергия магнитного поля, генерируемая в течение 12 мкс, может достигать 1,2 ГДж.

Работа ДВМГ обычно описывается эквивалентной электротехнической схемой

$$\frac{d[L(t)I(t)]}{dt} + R(t)I = V_n,$$

где $L(t)$ — текущая индуктивность ДВМГ (в начальный момент времени $L|_{t=0} = L_0 n$; n — число дисковых элементов); I — ток генератора ($I|_{t=0} = I_0$); $R(t)$ — сопротивление ДВМГ; V_n — сопротивление нагрузки.

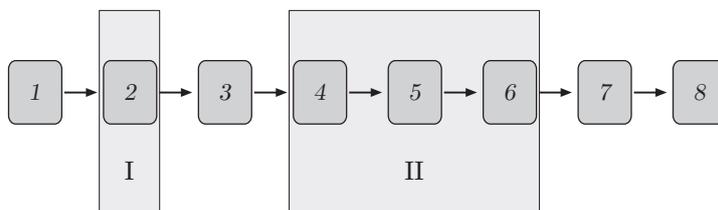


Рис. 1. Схема установки:

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]

ДВМГ	D , м	m , кг	L_0 , нГн	I_0 , МА	$E_{\text{ЕМГ}}$, МДж	τ_{eff} , 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	1,00	36,0	24	14,0	40,0	12,0

Поскольку эффективность преобразования энергии ВВ в энергию магнитного поля не превышает 20 %, индуктивность $L(t)$ определяется на основе газодинамических расчетов. Сопротивление $R(t)$ определяется на основе двумерных МГД-расчетов или экспериментов.

При коммутации тока из индуктивного накопителя в индуктивную нагрузку передается 1/4 запасенной энергии (ток делится пополам). При использовании 30-элементного сверхмощного ДВМГ после срабатывания двух каскадов происходит обострение тока на два порядка, 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 сила тока составляет $I_n \approx 100$ МА ($E = LI^2/2$).

Для подвода энергии ДВМГ к нагрузке за время ≈ 1 мкс применяются электровзрывные фольговые размыкатели тока 2 (см. рис. 1). В качестве материала фольги обычно используется медь. Параметры тока определяются на основе расчетов в одномерном МГД-приближении [7], уравнения которого в лагранжевых координатах (t, s) имеют вид (ось z направлена перпендикулярно поверхности фольги)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \frac{1}{\rho} &= \frac{\partial u_z}{\partial s}, & \frac{\partial z}{\partial t} &= u_z, & \frac{\partial u_z}{\partial t} &= -\frac{\partial p}{\partial s} - j_y \frac{B_x}{\rho}, \\ \frac{\partial B_x}{\partial t} \frac{1}{\rho} &= \frac{\partial E'_y}{\partial s}, & E'_y &= \frac{j_y}{\sigma}, & j_y &= \frac{\rho}{\mu_0} \frac{\partial B_x}{\partial s}, & \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + p \frac{\partial u_z}{\partial s} &= \frac{j_y E'_y}{\rho}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ, u_z — плотность и массовая скорость; p, ε — давление и удельная энергия вещества; B_x, E'_y — компоненты магнитного и электрического полей в системе отсчета, связанной с плазмой; j_y — плотность тока.

Хорошее согласие результатов расчетов и экспериментальных данных наблюдается при использовании закона проводимости $\sigma(\rho, \varepsilon)$, уравнений состояния меди $p(\rho, \varepsilon)$ из работы [8] и уравнений состояния лавсановой изоляции в форме Ми — Грюнайзена [9].

Применение классической схемы фольгового размыкателя тока 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. Напряженность электрического поля при электровзрыве фольги не превышает 1 МВ/м, т. е. длина фольги l_f должна быть больше 10 м. Существующие технологии позволяют обеспечить электропрочность изоляции над фольгой, не превышающую 100 МВ/м, т. е. толщина слоя изоляции d должна быть не менее 0,1 м. При указанных параметрах значение индуктивности над фольгой при ее расположении на радиусе $R = 2$ м составляет более 100 нГн, что существенно больше предполагаемой индуктивности подвода энергии к Z-пинчу.

В работе [10] для получения напряжений в нагрузке порядка 10 МВ предложено использовать малоиндуктивный электровзрывной размыкатель тока в виде змейки [11]. При формировании змейки из n звеньев индуктивность уменьшается в $2n$ раз. Таким образом, в описанных выше условиях при $n = 20$ индуктивность составит порядка 2,5 нГн.

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

Для формирования электровзрывными размыкателями тока импульсов тока длительностью порядка 100 нс необходима развязка цепи источника и нагрузки на стадии электровзрыва [10]. С этой целью во втором каскаде обострения тока используется вакуумный разрядник 6 (см. рис. 1). Вакуумные малоиндуктивные разрядники, предназначенные для

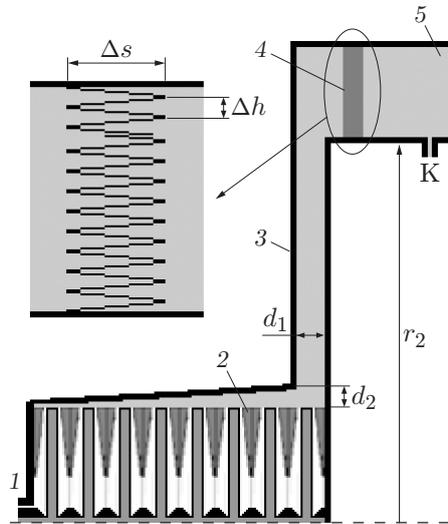


Рис. 2. Схема первого каскада обострения тока:

1 — спиральный ВМГ; 2 — ДВМГ, включающий 30 элементов; 3 — волновая линия; 4 — фольга; 5 — индуктивный накопитель; К — взрывной замыкающий ключ

коммутации тока при мегавольтных напряжениях за время $t < 10$ нс, разработаны в соответствии с программой “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 работе [13].

Первый каскад обострения тока. Схема первого каскада обострения тока 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 в контуре ДВМГ происходят электровзрыв фольги и срабатывание взрывного ключа К. При этом магнитная энергия поступает в индуктивный накопитель.

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 расчетной оптимизации параметров первого каскада будем решать систему уравнений (1) с заданными магнитными полями на поверхностях фольги, которые определяются из уравнений цепей источника и индуктивного накопителя

$$B_x|_{s=s_1} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_g}{r_2}, \quad B_x|_{s=s_2} = -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_{ind}}{r_2},$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [(L_g(t) + L_W)I_g] + R_g(t)I_g + E'_y|_{s=s_1} l_f = 0, \quad I_g|_{t=0} = I_0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (L_{ind}I_{ind}) + R_k I_{ind} - E'_y|_{s=s_2} l_f = 0, \quad I_{ind}|_{t=0} = 0,$$

где s_1, s_2 — лагранжевы координаты поверхностей фольги, обращенных к ДВМГ и индуктивному накопителю соответственно; r_2 — радиус, на котором размещена фольга (при проведении расчетов считалось, что $r_2 = 0,5; 0,8; 3,0$ м для ДВМГ малого, среднего классов и сверхмощного ДВМГ соответственно); I_g, I_{ind} — токи в цепи ДВМГ и индуктивного накопителя; R_k — сопротивление взрывного ключа.

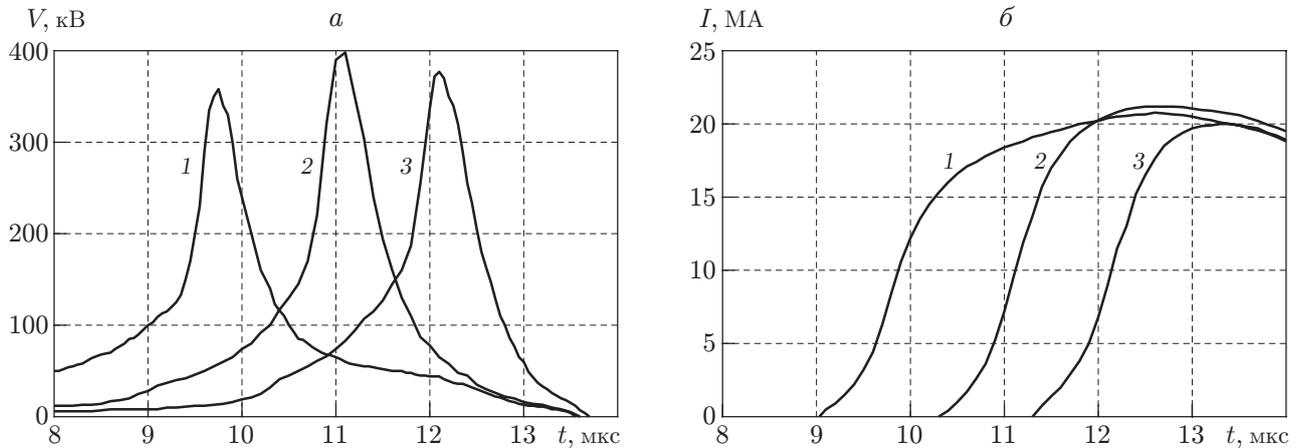


Рис. 3. Зависимости напряжения на фольге (а) и тока в индуктивном накопителе (б) от времени при различных толщинах фольги:
 1 — $\delta = 30$ мкм; 2 — $\delta = 40$ мкм; 3 — $\delta = 50$ мкм

Таблица 2

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

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

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

На рис. 3 представлены зависимости напряжения на фольге и тока в индуктивном накопителе от времени при фиксированной длине l_f для ряда толщин δ , полученные в расчете для ДВМГ малого класса. Максимальные ток в индуктивном накопителе и напряжение на фольге реализуются при $\delta = 40$ мкм. Эта толщина фольги является оптимальной. Расчеты показали, что оптимальная толщина фольги не зависит от ее длины l_f .

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

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. При проведении расчетов электровзрыв фольги второго каскада описывался одномерными МГД-уравнениями (1). При этом магнитные поля на поверхностях фольги определялись по токам в цепях индуктивного накопителя I_{ind} и Z-пинча I_p . Токи I_{ind} и I_p рассчитывались с использованием электротехнических уравнений для описания цепей ДВМГ, первого каскада обострения тока, индуктивного

накопителя и вакуумной волновой линии:

$$\begin{aligned}
 B_x|_{s=s_1} &= -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_{ind}}{r_2}, & B_x|_{s=s_2} &= -\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_p}{r_2}, \\
 \frac{\partial}{\partial t} [(L_g(t) + L_W)I_g] + R_g(t)I_g + R_1(I_g - I_{ind}) &= 0, & I_g|_{t=0} &= I_0, \\
 \frac{\partial}{\partial t} (L_{ind}I_{ind}) + R_k I_{ind} - R_1(I_g - I_{ind}) + E'_y|_{s=s_1} l_{pf} &= 0, & I_{ind}|_{t=0} &= 0, \\
 \frac{\partial}{\partial t} [(L_V + L_p)I_p] + R_{dich}I_p - E'_y|_{s=s_2} l_{pf} &= 0, & I_p|_{t=0} &= 0.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь R_1 — сопротивление фольги первого каскада обострения тока; L_V — индуктивность вакуумной волновой линии, принятая равной 10 нГн; сопротивление вакуумного разрядника R_{dich} считалось бесконечным и принималось равным нулю при достижении напряжением пробойного значения V_{br} .

Ток Z-пинча I_p оценивается из соотношения $I_p \sim I_{ind}L_{ind}/(L_{ind} + L_V) \approx 12$ МА.

Для переброски такого тока в нагрузку за время $\Delta t \approx 100$ нс необходим разрядник с пробойным напряжением $V_{br} \sim L_V I_p / \Delta t \approx 1,2$ МВ.

Индуктивность Z-пинча L_p определяется из соотношения

$$L_p(t) = \frac{\mu_0 z_0}{2\pi} \ln \frac{r_0}{r(t)}. \tag{3}$$

Здесь $z_0 = 20$ мм, $r_0 = 15$ мм — высота Z-пинча и его начальный радиус; $r(t)$ — текущий радиус Z-пинча, определяемый из решения уравнений

$$\frac{dr}{dt} = v, \quad \frac{dv}{dt} = -\frac{\mu_0 z_0}{4\pi} \frac{I_p^2}{m_Z r}, \tag{4}$$

где m_Z — масса Z-пинча. Начальные условия для радиуса и скорости имеют вид $r|_{t=0} = r_0$, $v|_{t=0} = 0$.

Расчетная оптимизация параметров фольги проводилась при работе источника тока на индуктивную нагрузку, равную L_V .

На рис. 4 представлены расчетные зависимости напряжения на фольге и тока в вакуумной волновой линии от времени при длине фольги $l_f = 2,5$ м и различных толщинах δ . Видно, что фольга толщиной $\delta = 8$ мкм обеспечивает максимальное напряжение и минимальное время нарастания тока. Заметим, что выбранная при проведении расчетов длина фольги также соответствует максимальному напряжению и минимальной длительности импульса тока.

Второй каскад целесообразно строить в соответствии с модульным принципом (рис. 5). 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 на поверхности проходного изолятора не превышает 6 кВ/мм, напряженность пробойного поля вакуумного разрядника составляет 1,2 МВ. Будем считать, что расстояние между электродами подводящей энергию к Z-пинчу волновой линии уменьшается с 10 до 5 мм.

Для указанных выше параметров в табл. 3 приведены значения индуктивности одного модуля обострения тока L_1 и волновой линии для подвода энергии к Z-пинчу L_Z при различных значениях радиуса r_2 , на котором размещена фольга. Полная индуктивность подвода энергии к Z-пинчу определяется из соотношения $L_V = N L_1 + L_Z$. Для ДВМГ малого класса $N = 1$, $r_2 = 0,5$ м.

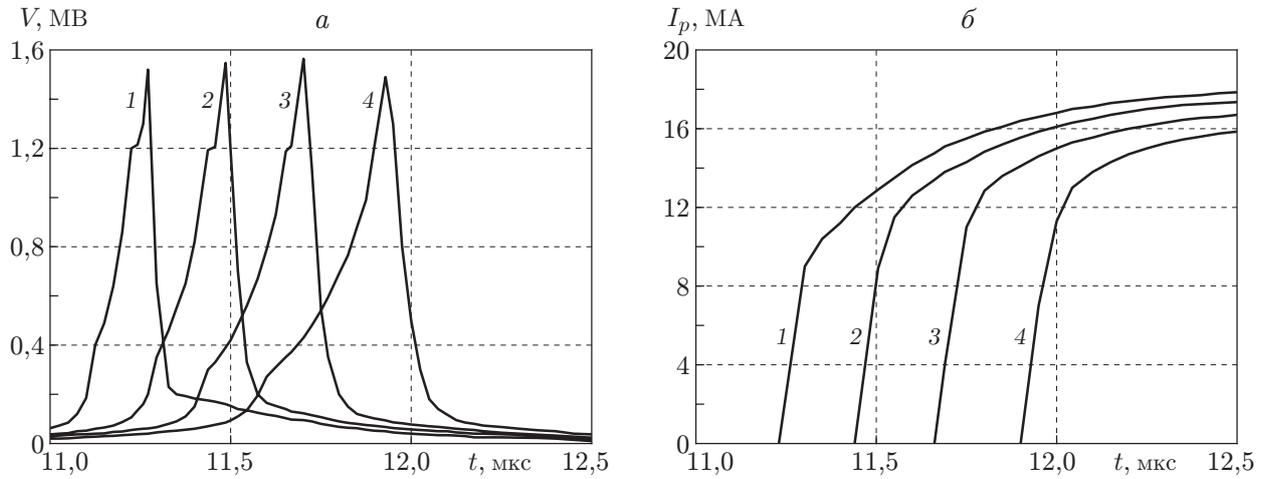


Рис. 4. Зависимости напряжения на фольге (а) и тока в вакуумной волновой линии (б) от времени при различных толщинах фольги:
 1 — $\delta = 4$ мкм; 2 — $\delta = 6$ мкм; 3 — $\delta = 8$ мкм; 4 — $\delta = 10$ мкм

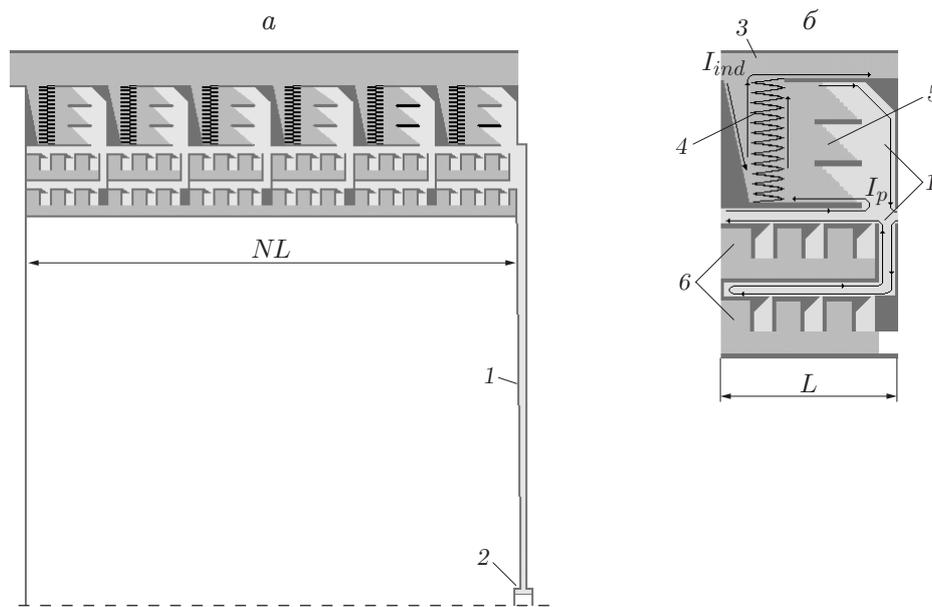


Рис. 5. Схема второго каскада обострения тока:
 а — каскад; б — модуль каскада; 1 — вакуумная волновая линия, 2 — Z-пинч, 3 — индуктивный накопитель, 4 — электровзрывной размыкатель тока, 5 — проходной изолятор, б — вакуумный разрядник, стрелки — направление тока

Таблица 3

Индуктивность одного модуля обострения тока и вакуумной волновой линии в зависимости от радиуса, на котором размещена фольга

r_2 , м	L_1 , нГн	L_Z , 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 обострителя тока

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 электровзрыв фольги второго каскада обострения тока описывался системой уравнений МГД-приближения (1). При этом характеристики ДВМГ, первого каскада обострения тока, Z-пинча моделировались с использованием уравнений (2)–(4) с оптимизированными параметрами фольги. Расчеты проводились до момента времени имплозии Z-пинча, в который значение координаты r становилось равным 0,1 начального значения r_0 .

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. В расчетах считалось, что масса m_Z оптимальна, если время имплозии составляет порядка 100 нс.

На рис. 6 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 силы тока I_p при имплозии Z-пинчей в оптимальных условиях (за время ≈ 100 нс) и кинетической энергии E_k в зависимости от количества модулей N во втором каскаде обострения импульса тока для различных классов ДВМГ. Из табл. 5 следует, что параметры источника тока на базе ДВМГ малого класса аналогичны параметрам установки PTS, а параметры источника тока на базе ДВМГ среднего

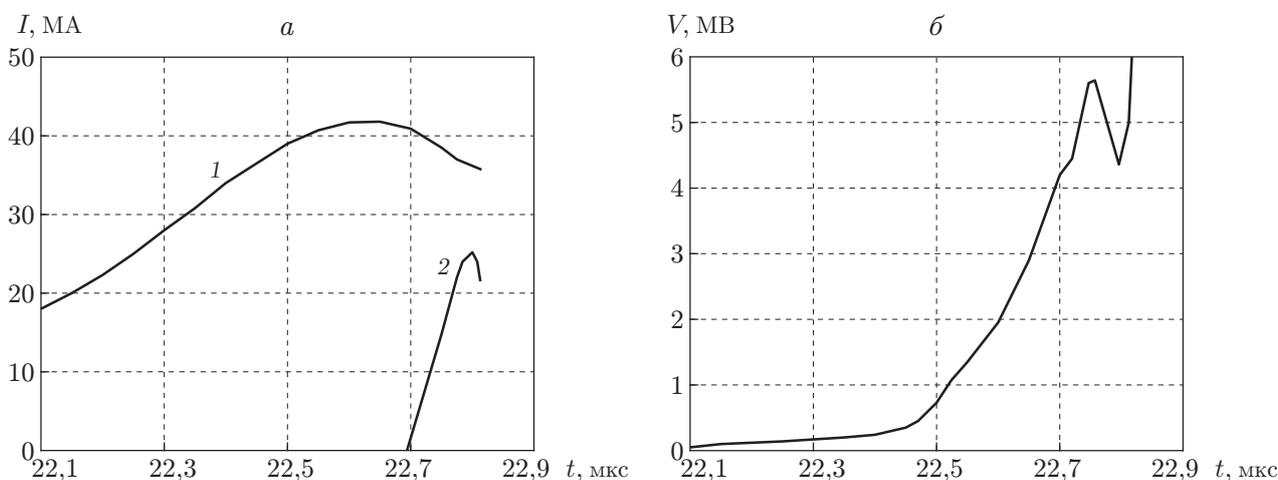


Рис. 6. Зависимости токов (а) и напряжения (б) на обострителе тока в виде змейки от времени для ДВМГ среднего класса при $N = 4$, $m_Z = 14,5$ мг:

1 — ток индуктивного накопителя I_{ind} ; 2 — ток Z-пинча I_p

Таблица 5

Значения силы тока при имплозии Z-пинча и кинетической энергии

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

класса — параметрам установки Z. Источник тока на базе сверхмощного ДВМГ способен осуществить имплозию Z-пинча при силе тока 90 МА за время ≈ 100 нс, при этом энергия рентгеновского излучения в два раза превысит энергию, необходимую для достижения порога зажигания термоядерной мишени.

Заключение. Показана принципиальная возможность имплозии Z-пинча при силе тока 90 МА за время ≈ 120 нс с применением сверхмощных ДВМГ. При этом энергия рентгеновского излучения ≈ 40 МДж в два раза превысит энергию, необходимую для достижения порога зажигания термоядерной мишени.

Технологию формирования импульсов тока с временем нарастания ≈ 100 нс можно разработать поэтапно: сначала для ДВМГ малого класса (сила тока ≈ 10 МА), затем для ДВМГ среднего класса (сила тока ≈ 25 МА) и, наконец, для сверхмощного ДВМГ.

ЛИТЕРАТУРА

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. Vesey R. A., Herrmann M. C., Lemke R. M., et al. Target design for high fusion yield with the double Z-pinch-driven hohlraum // Phys. Plasmas. 2007. V. 14, N 4. 056302.
3. Chernyshev V. K., Demidov V. A., Grinevich B. Ye., et al. Fast-operating disk EMG using planar disks // Proc. of the 6th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and pulsed power application (MG-VI). Albuquerque, Nov. 8–11, 1994. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1994. P. 547–556.
4. 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., Las Vegas, June 17–22, 2001. S. l.: IEEE, 2001. P. 971–973.
5. 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 СО РАН, 2004. С. 224–228.
6. Garanin S. G., Ivanovsky A. V., Mkhitarayan L. S. An ICE system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator // Nuclear Fusion. 2011. V. 51. 103010.

7. **Буйко А. М., Данов В. М., Мамышев В. И. и др.** Методика численного моделирования дисковых взрывамагнитных генераторов с электровзрывным 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 расчет взрывающихся проводников // Журн. техн. физики. 1976. Т. 46, вып. 9. С. 1963–1969.
9. **Физика взрыва** / Под ред. Ю. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.
10. **Ивановский А. В.** Взрывной источник тока РW-мощности — миф или реальность? // Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та эксперим. физики. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 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. of the 11th IEEE Intern. pulsed power conf., Baltimore, June 29 — July 2, 1997. Baltimore: Naval Res. Lab., 1997. P. 1208–1212.
12. **Долгачев 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.

Поступила в редакцию 16/X 2014 г.
