

УДК 553.95, 537.84, 621.039

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ЭНЕРГИЮ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ

К. В. Горбачев, В. М. Михайлов, Е. В. Нестеров,
В. А. Строганов, Е. В. Черных

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия
E-mails: GKV.67@mail.ru, VM-user@rambler.ru, NST@ihed.ras.ru,
alexgovoro@yandex.ru, tchernykh.ev@yandex.ru

Проведено исследование проблемы создания физико-технических основ генерации мощных наносекундных сильноточных импульсов на основе взрывных магнитокумулятивных генераторов. Методом индуктивных накопителей осуществлено согласование относительно низкоомных взрывных магнитокумулятивных генераторов и высокоимпедансных нагрузок: коротких формирующих линий и вакуумных диодов. Приведены результаты экспериментов по запитке таких нагрузок.

Ключевые слова: взрывной магнитокумулятивный генератор, индуктивный накопитель энергии, электровзрывной прерыватель тока, формирующая линия, вакуумный диод.

Основным преимуществом взрывных магнитокумулятивных генераторов (ВМКГ) является генерация больших порций энергии. К настоящему времени созданы ВМКГ с энергоемкостью более 100 МДж. Не менее важным преимуществом ВМКГ являются высокие плотность генерируемой энергии ($\approx 10^8$ Дж/м³) и удельная мощность ($\approx 10^{13}$ Вт/м³), что позволяет создавать на основе ВМКГ мощные автономные транспортабельные источники электромагнитной энергии с минимальным количеством взрывчатого вещества (ВВ), а следовательно, многократно использовать нагрузку. При создании ВМКГ необходимо решить три задачи: 1) обеспечить автономность; 2) минимизировать массу ВВ; 3) обеспечить эффективную работу обострителя на основе индуктивного накопителя энергии (ИНЭ) с электровзрывным прерывателем тока (ЭВПТ).

Результаты исследования короткоимпульсных ВМКГ свидетельствуют о том, что дальнейшее увеличение их мощности возможно путем создания энергетических комплексов, основанных на последовательно-параллельном соединении нескольких одновременно срабатывающих генераторов. В частности, была исследована батарея из двух двухкаскадных взрывных магнитокумулятивных генераторов (2КВМКГ) с перехватом магнитного потока. Двухкаскадный ВМКГ состоит из предусилителя и динамического трансформатора (ДТ), вторичная обмотка которого осуществляет перехват магнитного потока, созданного предусилителем в первичной обмотке. Предусилитель и динамический трансформатор смонтированы на одном лайнере. На рис. 1 показана схема соединения двух 2КВМКГ с последовательным соединением вторичных обмоток ДТ (C_0 — емкость кон-

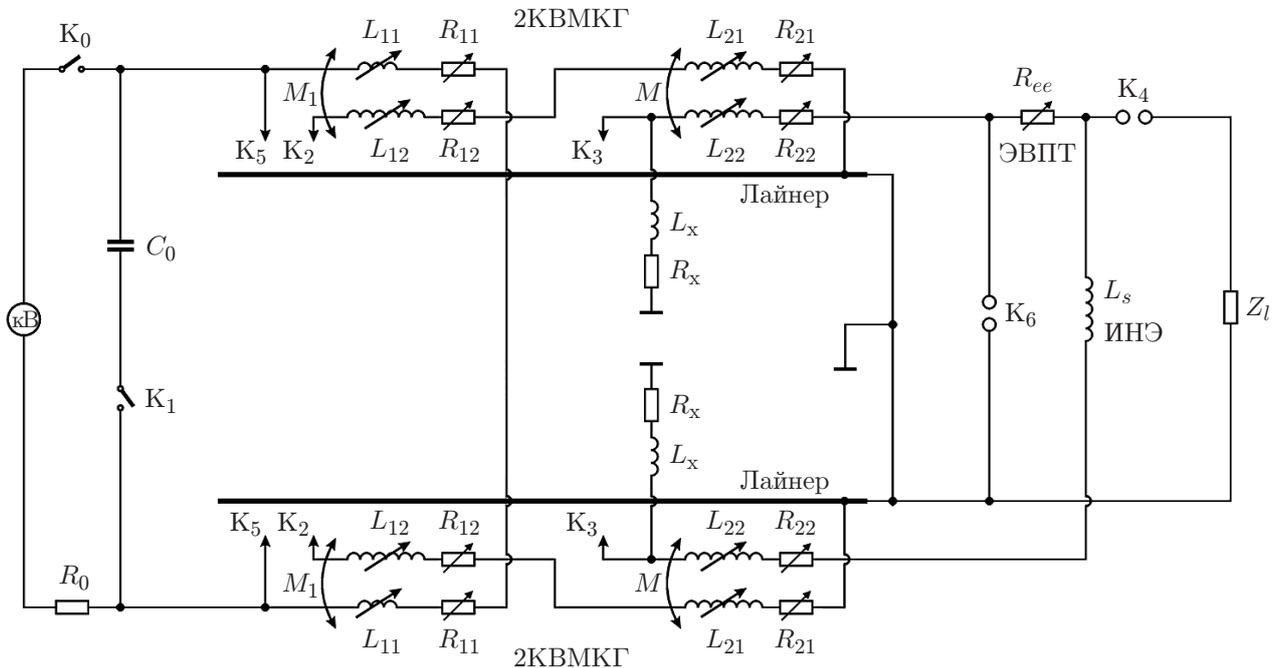


Рис. 1. Электрическая схема электропитания высокоимпедансной нагрузки с помощью двух последовательно соединенных по вторичным обмоткам ДТ двух-каскадных ВМКГ

денсатора при начальной зарядке током внешних спиралей L_{11} трансформаторного ввода магнитного потока; L_{12} — индуктивность предусилителя; L_{21} , L_{22} — индуктивность первичной и вторичной обмоток ДТ соответственно; Z_l — нагрузка; K_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) — замыкающие ключи; R_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2$) — сопротивления обмоток 2КВМКГ; R_{ee} — сопротивление ЭВПТ; L_s — индуктивность ИНЭ; L_x , R_x — индуктивность и сопротивление цепи при работе ДТ в холостом режиме). Видно, что лайнеры 2КВМКГ имеют одинаковые потенциалы [1].

С помощью компьютерной программы “Solenoid” [2], реализующей конечно-элементную декомпозиционную модель цилиндрического 2КВМКГ со связью между каскадами, методом перехвата магнитного потока рассчитаны законы вывода индуктивности, взаимные индуктивности всех спиралей и напряжения в системе лайнер — спираль для каждого витка спиралей генератора. Расчет токов в контурах в случае последовательного соединения можно проводить так же, как для одного 2КВМКГ с уменьшенными в два раза индуктивностью ИНЭ и сопротивлением ЭВПТ. По сравнению с одним 2КВМКГ батарея из двух генераторов обеспечивает большее напряжение на нагрузке (рис. 2) и меньшее эффективное по интегралу действия тока время

$$t_{eff} = \frac{1}{(I_{22}^m)^2} \int_0^{t_f} I_{22}^2 dt.$$

Здесь I_{22} , I_{22}^m — ток во вторичной обмотке ДТ и его максимальное значение; t_f — время полного вывода индуктивности генератора. Эффективное время наиболее полно характеризует степень согласованности ВМКГ и ЭВПТ. Если потери в ВМКГ охарактеризовать с помощью коэффициента совершенства генератора

$$F = \frac{\ln [I(t)/I_0]}{\ln [(\lambda_0 + 1)/(\lambda(t) + 1)]},$$

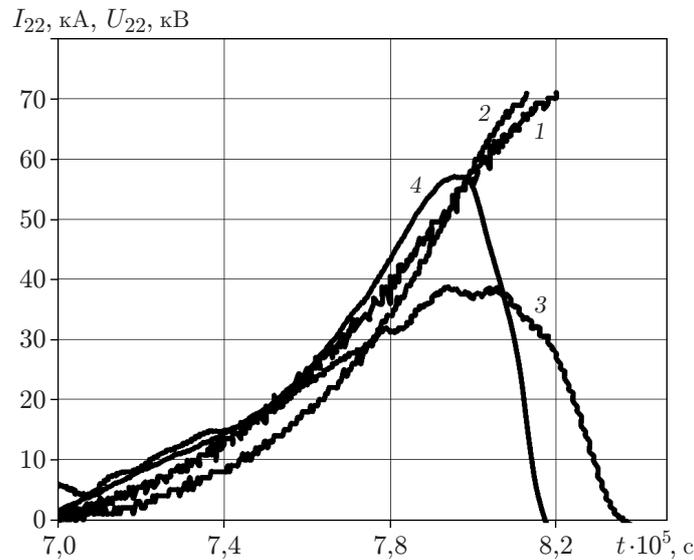


Рис. 2. Экспериментальные зависимости основных параметров одного ДТ диаметром 80 мм (1, 3) и связки из двух ДТ диаметром 70 мм (2, 4) от времени: 1, 2 — ток вторичной обмотки ДТ I_{22} , 3, 4 — напряжение на нагрузке U_{22}

то величину t_{eff} можно вычислить по формуле

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

где $\lambda(t) = L(t)/L_s$; $L(t)$ — закон вывода индуктивности ВМКГ; L_s — индуктивность ИНЭ. Таким образом, с увеличением λ и F эффективное время уменьшается.

На рис. 3 показана схема ВМКГ с перехватом магнитного потока. Обмотки генератора представляют собой плоские архимедовы спирали. Две одинаковые рабочие плоские спирали 2, 3 с постоянным шагом последовательно включены в контур с ИНЭ и ЭВПТ. Внешние плоские спиральные обмотки 1, 4 включены в цепь предусилителя энергии 6 таким образом, что оба дисковых лайнера 5 имеют одинаковые потенциалы.

Такая конструкция ВМКГ позволяет более полно использовать энергию заряда ВВ, поделить возникающее в нагрузке высокое напряжение, увеличить коэффициент перестройки индуктивностей. Следует отметить, что увеличение коэффициента перестройки приводит к более значительному увеличению энергии и магнитного потока и более существенному уменьшению эффективного времени нарастания тока в ИНЭ. Рассматриваемый ВМКГ функционирует следующим образом. Предусилитель 6 обеспечивает запитку обмоток 1, 4 током. В процессе запитки внешних спиралей вторичный контур обесточен. Момент срабатывания детонаторов 7 синхронизируется таким образом, чтобы замыкание вторичного контура происходило в момент достижения максимума тока в первичном контуре. Замыкание осуществляется путем разрушения изоляции первых витков спиралей 2, 3 подлетающими к ним лайнерами, принимающими форму усеченных конусов с углом при вершине, зависящим от соотношения масс заряда ВВ и лайнера. Осуществляется быстрая компрессия магнитного поля, созданного первичной обмоткой, и перехваченный ею магнитный поток вытесняется в ИНЭ. Быстро нарастающий ток обеспечивает взрывное нарастание сопротивления ЭВПТ и увеличение напряжения на разделительном разряднике, настроенном на оптимальное напряжение срабатывания. При пробое разрядника ток из ЭВПТ

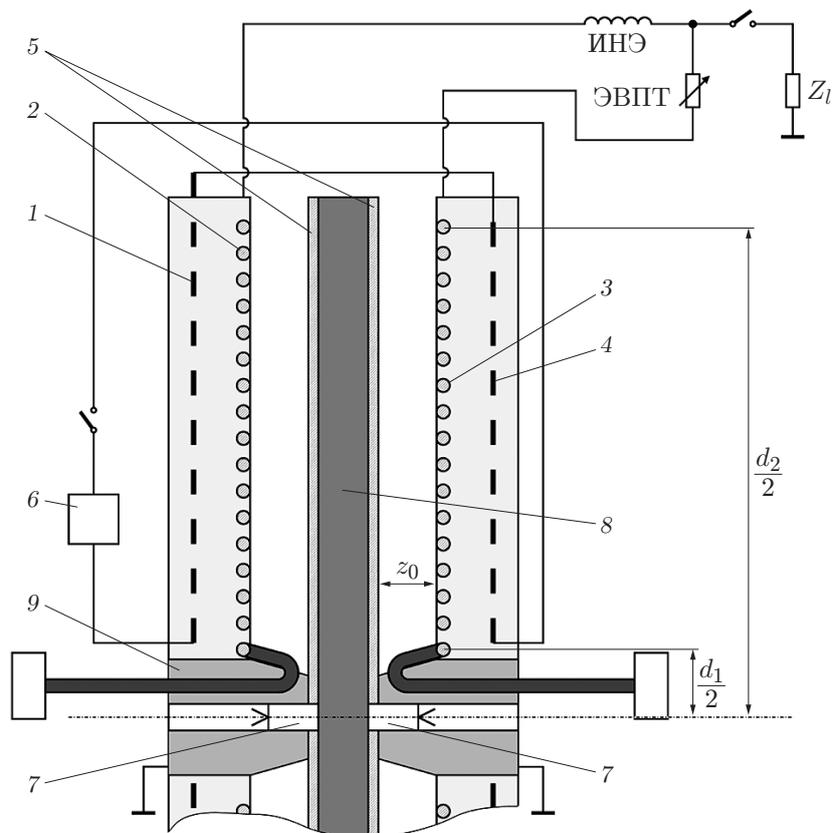


Рис. 3. Электрическая схема генерации наносекундного сильноточного импульса высокого напряжения с использованием двухполостного спирального радиального ДТ при последовательном соединении вторичных обмоток:

1, 4 — внешние плоские спиральные обмотки, 2, 3 — плоские спирали, 5 — дисковые лайнеры, 6 — предусилитель энергии, 7 — детонаторы, 8 — заряд ВВ, 9 — втулка

переключается в нагрузку Z_l , в которой формируется сильноточный наносекундный импульс тока.

Ранее ВМКГ с плоскими спиралями использовались только в качестве высокоиндуктивных предусилителей магнитной энергии [3, 4]. В работе [5] проведено экспериментальное исследование работоспособности спирального радиального магнитокумулятивного генератора (СРМКГ) и возможности применения ВМКГ этого типа в качестве динамического трансформатора для формирования быстро нарастающих импульсов тока, в частности для запитки высокоимпедансной нагрузки ИНЭ–ЭВПТ. Эффективное время t_{eff} для спирально-радиального динамического трансформатора (СРДТ) сравнимо с эффективным временем, реализуемым в таком быстроходном генераторе, как цилиндрический ВМКГ с осевым одновременным инициированием заряда ВВ [6]. Оба генератора имеют возрастающую в процессе компрессии магнитного поля производную индуктивности спирали, малое эффективное время и высокое напряжение, но СРМКГ не требует использования сложной системы осевого инициирования заряда. Поскольку длина ВМКГ с осевым инициированием заряда при заданном времени компрессии не ограничена сверху, диаметр провода спирали может быть увеличен, что позволит увеличить толщину слоя изоляции и, следовательно, напряжение на выходе генератора. Генератор этого типа будет применяться в сверхмощных системах.

Таблица 1

Форма спиралей ДТ	t_{eff} , мкс		Y, МВ
	$\lambda_0 = 1$	$\lambda_0 = 10$	
Цилиндрическая	3,05	1,74	0,107
Коническая ($\theta = 5^\circ$, $\alpha = 14^\circ$)	2,25	1,25	0,125
Цилиндрически-коническая ($\theta = 18^\circ$, $\alpha = 14^\circ$)	1,18	0,78	0,109
Плоская ($\alpha = 40^\circ$)	1,79	0,91	0,120

Экспериментальные исследования СРДТ [5] выполнены на небольшой модели, представляющей собой половину СРДТ, показанного на рис. 3, т. е. СРДТ с одной тороидальной полостью. СРДТ был нагружен на ИНЭ с индуктивностью $L_s = 3$ мкГн. Основными параметрами модельного генератора являются осевая длина тороидальной диэлектрической (воздушной) полости $z_0 = 30$ мм, внешний диаметр спиралей 1 и 2 $d_2 = 120$ мм, внутренний диаметр $d_1 = 30$ мм, число витков спирали 2 $w_2 = 17$, спирали 1 — $w_1 = 10$, начальная индуктивность спирали 2 $L_{220} = 15,2$ мкГн, спирали 1 — $L_{210} = 4,25$ мкГн, начальная взаимная индуктивность спиралей $M = 6,34$ мкГн. Дисковый заряд ВВ из насыпного гексогена диаметром 120 мм и толщиной 30 мм контактировал с медным дисковым лайнером толщиной 1 мм. Выбор начальных параметров и предварительные выходные параметры рассчитывались на основе законов вывода индуктивностей и взаимоиндуктивностей, полученных при использовании аналоговой модели генератора.

При коэффициенте перестройки индуктивности $\lambda = L_{22c}/L_s = 5$ (L_{22c} — индуктивность вторичной обмотки в момент перехвата магнитного потока) рассчитанное по зависимости $I_{22}(t)$ эффективное время равно $t_{eff} = 1,56$ мкс, что свидетельствует о высоком быстродействии генератора, соизмеримом с быстродействием ВМКГ с осевым иницированием заряда.

При сравнении схем ДТ необходимо учитывать большое количество параметров. Описывать и анализировать результаты в многомерном пространстве весьма затруднительно, поэтому следует выбрать критерий эффективности работы ДТ. Таким критерием сравнения работы ДТ в системе с ИНЭ и ЭВПТ может являться произведение $\Phi_s^m \beta$, пропорциональное напряжению на накопителе U_s ($\Phi_s^m = I_{22}^m L_s$ — максимальный магнитный поток в накопителе; β — инкремент сопротивления прерывателя тока). При оптимальном значении диаметра проводника инкремент β пропорционален t_{eff}^{-1} [7]. Таким образом, условное напряжение на накопителе равно $Y = I_{22} L_s / t_{eff}$.

В табл. 1 приведены значения t_{eff} для четырех рассмотренных конфигураций спиралей ДТ при начальных значениях коэффициента перестройки индуктивности $\lambda_0 = 1, 10$. Первые три ДТ одинаковой длины имели цилиндрические лайнеры, а последний с плоскими спиральями — дисковый лайнер. В первом ДТ использовались цилиндрические спирали, во втором — конические, а в третьем — комбинированные спирали. Внутренняя спираль третьего ДТ состояла из участка цилиндрической спирали и секции конической спирали с углом наклона к оси, превышающим угол раскрытия лайнера под действием продуктов детонации, вследствие чего направление скольжения точки контакта лайнер — спираль противоположно направлению движения детонационной волны. При этом нагрузка подключается к последнему витку цилиндрического участка спирали и первому витку конического участка. Во всех генераторах шаг спиралей был один и тот же. До подрыва заряда диаметры цилиндрических лайнеров были равны 30 мм, а максимальные диаметры спиралей первых трех ДТ — 76 мм. Внешний диаметр плоской спирали радиального генератора составлял 125 мм (при условии, что рабочий объем этого генератора при осевой длине 30 мм равен рабочему объему ДТ с цилиндрической спиралью).

Таблица 2

Расчетные значения тока зарядки ИНЭ, эффективного времени и условного напряжения в зависимости от длины ДТ

l_{22} , мм	I_{22} , кА	t_{eff} , мкс	Y , кВ
60	47,4	1,85	128,0
75	55,0	2,26	121,5
90	59,0	2,60	113,5
105	58,6	2,56	114,5
130	67,5	3,04	111,0

Наименьшее значение времени t_{eff} у спирального ВМКГ с комбинированной спиралью. В этом ВМКГ угол наклона спирали $\theta = 18^\circ$, а полуугол раскрытия лайнера $\alpha = 14^\circ$. Для каждой формы спирали вычислены значения условного напряжения на электровзрывном прерывателе Y (см. табл. 1). Из табл. 1 следует, что различие значений Y является незначительным (приблизительно 10 %). Это обусловило выбор технологичной цилиндрической формы спирали малой длины, но только для батареи, состоящей из двух 2КВМКГ с последовательно соединенными обмотками ДТ.

Из зависимости эффективного времени работы ДТ от коэффициента перестройки его индуктивности следует, что равенство напряжения холостого хода на вторичной обмотке ДТ допустимому напряжению на первом витке вторичной обмотки ДТ является необходимым, но недостаточным условием для минимизации массы ВВ. Перенесение усиления энергии на предусилитель за счет снижения индуктивности первичной обмотки ДТ приводит к увеличению длины предусилителя (для уменьшения производной тока вследствие увеличения напряжения холостого хода) либо к уменьшению коэффициента трансформации ДТ и соответственно коэффициента перестройки индуктивностей, что в конечном счете вызывает увеличение t_{eff} . Таким образом, необходима оптимизация распределения между каскадами коэффициентов усиления энергии. Число витков вторичной обмотки ДТ ограничено напряжением холостого хода. С уменьшением числа витков в первичной обмотке требуется уменьшать число витков во вторичной обмотке, чтобы не было превышено допустимое напряжение холостого хода. При малом числе витков в первичной обмотке значение Y уменьшается вследствие больших значений эффективного времени, а при большом числе витков уменьшение Y обусловлено уменьшением магнитного потока в накопителе. В результате получаем оптимальное значение $Y = 0,087$ МВ, соответствующее числу витков в первичной обмотке $W_{21} = 4$.

В табл. 2 приведены расчетные значения тока зарядки ИНЭ, эффективного времени и условного напряжения в зависимости от длины динамического трансформатора l_{22} с диаметром спирали во вторичной обмотке 80 мм и постоянным шагом намотки. В исследованном диапазоне длин ДТ условное напряжение изменяется незначительно.

Двухкаскадный ВМКГ использовался в качестве первичного источника энергии в экспериментах по генерации сильнооточного кольцевого пучка электронов в резонансной релятивистской лампе обратной волны (ЛОВ) [8]. Поскольку вакуумный диод ЛОВ имеет относительно высокий импеданс (приблизительно 100 Ом), кабельный индуктивный накопитель состоял из одного радиотехнического кабеля РК-50-24 длиной 16 м с индуктивностью около 4 мкГн, что определило выбор параметров вторичной обмотки динамического трансформатора в 2КВМКГ. Спираль этой обмотки диаметром 80 мм состояла из двух секций: одновитковой длиной 20 мм (распределенный замыкатель) и с 35 витками длиной 76 мм. Обмотка навивалась высоковольтным кабелем с многослойной (полиимид с фторопластом) изоляцией. Предусилитель состоял из трех секций (каждая длиной 60 мм)

с оптимальным по напряжению холостого хода на вторичной обмотке ДТ распределением витков в секциях: шаг первой секции $h_{11} = 1,6$ мм, второй — $h_{12} = 5$ мм (три захода), третьей — $h_{13} = 12$ мм (6 заходов).

Улучшение продольного распределения высокочастотного поля за счет отражения рабочей моды поперечных магнитных собственных волн TM_{01} от концов электродинамической системы и оптимизации взаимодействия электронного пучка как со встречной, так и с попутной волной позволило достичь высокой эффективности генерации [9]. Преимуществом релятивистской резонансной ЛОВ по сравнению с обычной релятивистской ЛОВ является также меньшая длина пространства взаимодействия, приближенно равная трем длинам волны, а следовательно, меньшие затраты энергии на создание магнитного поля сопровождения. Для генерации магнитного поля использовался высокоиндуктивный многосекционный спиральный ВМКГ. Синхронизация работы обоих ВМКГ для обеспечения прохождения электронного пучка в однородном магнитном поле осуществлялась с помощью взрывной линии задержки. Для повышения достигнутого в [8] уровня микроволнового излучения (0,75 ГВт) в дальнейших экспериментах использовалась батарея из двух 2КВМКГ (см. [8]) с последовательно соединенными вторичными обмотками ДТ. Индуктивный накопитель представлял собой соленоид с индуктивностью 6 мкГн.

Измерение параметров микроволнового излучения проводилось с использованием калиброванного детектора, направленного ответвителя в выходном тракте генератора и широкоапертурного калориметра [10].

В оптимальном режиме ток в индуктивном накопителе в момент его переключения в вакуумный диод равен 44 кА, напряжение на катоде — 880 кВ и ток в кольцевом пучке электронов — 11,4 кА. Ток утечки на анод составил 2 кА. На рис. 4 представлены осциллограммы напряжения на катоде, токов в прерывателе и вакуумном диоде.

На рис. 5 показан источник высокого напряжения для запитки вакуумного диода, состоящий из связки двух 2КВМКГ, системы обострения импульса генерируемого ими тока и узла первичного источника магнитного потока.

Другим видом высокоимпедансной нагрузки рассматриваемой схемы преобразования являются короткие формирующие линии, генерирующие мощные импульсы с использованием двухкаскадного обострителя импульса тока ВМКГ. Первый каскад служит для зарядки промежуточного малоиндуктивного конденсатора. В начале работы устройства индуктивный накопитель заряжается током от ВМКГ. После срабатывания ЭВПТ происходит наносекундная зарядка конденсатора. Вторым каскадом, в котором формируется высоковольтный импульс, состоит из последовательно соединенных индуктивности и емкости нагрузки. При достижении максимального напряжения на промежуточной емкости срабатывает разрядник, расположенный между первым и вторым каскадами. Быстрое подключение второго каскада к промежуточному конденсатору приводит к ударной перезарядке емкостей. Так как емкость нагрузки существенно меньше емкости промежуточного конденсатора, напряжение на нагрузке почти в два раза превышает исходное. Индуктивность второго каскада, выбранная таким образом, чтобы длительность процесса перезарядки составляла 15 нс, равна 5 мкГн.

В экспериментах в качестве промежуточного емкостного накопителя использовалась короткая формирующая линия с водяным диэлектриком. Эффективная емкость этой линии составила 2 нФ, волновое сопротивление $Z_0 = 3$ Ом, а ее электрическая длина (время распространения сигнала вдоль линии с момента его появления на одном из ее концов) равна 6 нс. С учетом приведенных в [11] данных для повышения эффективности передачи энергии использовались способы, предложенные в [12] для контуров, содержащих индуктивность, емкость и сопротивление: 1) осуществить принцип “согласованного” взрыва, в котором энергия, запасенная в первичном накопителе, полностью выделяется в провод-

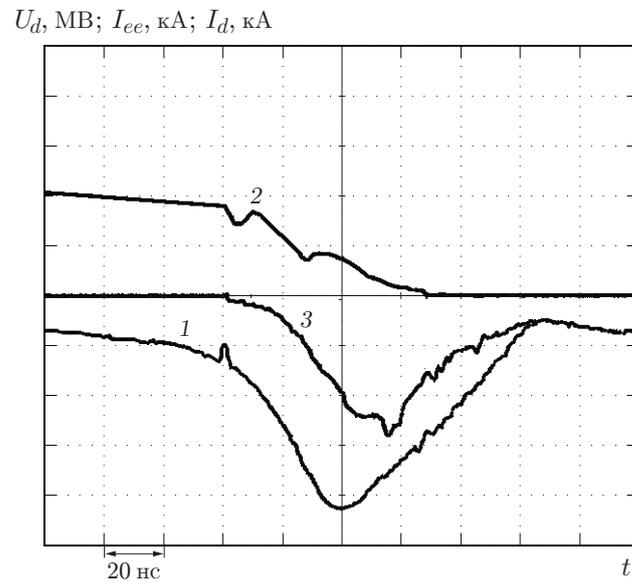


Рис. 4. Экспериментальные зависимости напряжения на вакуумном диоде U_d (цена деления — 0,21 МВ) (1), тока через электровзрывной прерыватель I_{ee} (цена деления — 22 кА) (2), тока через диод I_d (цена деления — 4,05 кА) (3) от времени при электропитании индуктивного накопителя от связки из двух 2КВМКГ

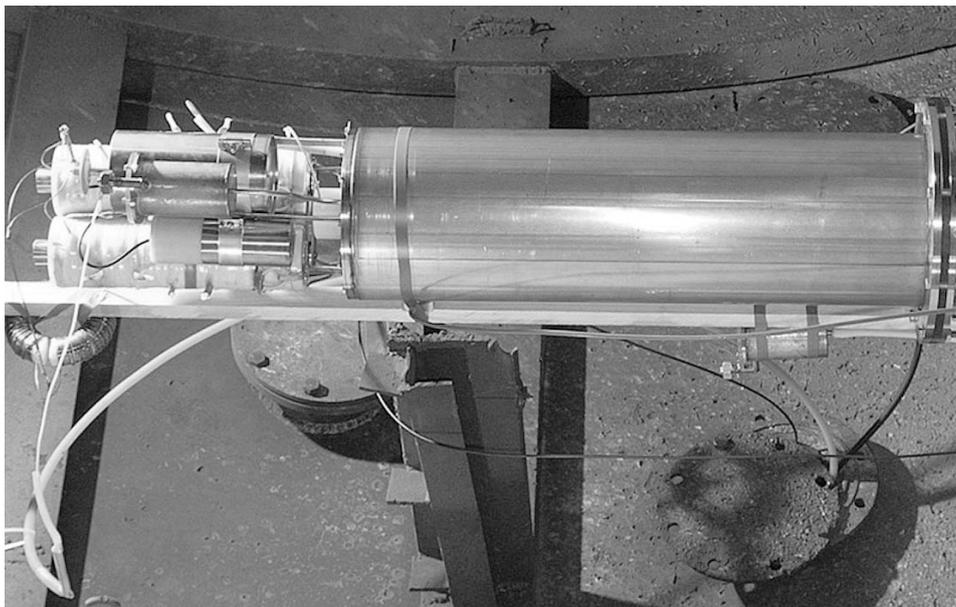


Рис. 5. Источник высокого напряжения для запитки вакуумного диода, состоящий из связки двух 2КВМКГ, системы обострения импульса генерируемого ими тока и узла первичного источника магнитного потока

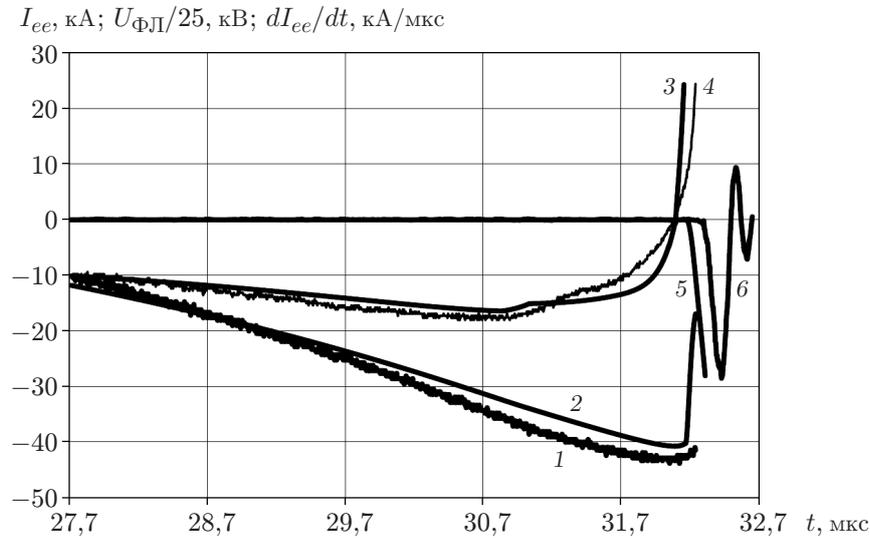


Рис. 6. Расчетные (1, 3, 5) и экспериментальные (2, 4, 6) зависимости основных электрических параметров от времени при зарядке от двух последовательно соединенных 2КВМКГ:

1, 2 — ток в ЭВПТ I_{ee} , 3, 4 — производная тока в ЭВПТ dI_{ee}/dt , 5, 6 — напряжение на ФЛ $U_{ФЛ}/25$

нике и нагрузке в течение времени действия первого импульса тока; 2) обеспечить более раннее подключение нагрузки при большем токе в индуктивности; 3) использовать прерыватель меньшей длины, чтобы сохранить плотность введенной энергии, необходимую для обеспечения достаточно высокой электрической прочности и сопротивления ЭВПТ. При подключении емкости в момент электрического взрыва и быстром росте сопротивления ЭВПТ вследствие отбора в емкость формирующей линии части энергии критическая длина (при нулевой длительности паузы с момента отключения тока до момента его включения) становится избыточной, поэтому длина проводника может быть уменьшена. Чем больше емкость формирующей линии, тем более существенно можно уменьшить длину проводника. На рис. 6 приведены расчетные зависимости основных электрических параметров от времени. Напряжение КФЛ после зарядки превысило 1 МВ [13]. Зависимости, представленные на рис. 6, были получены с использованием полуэмпирической модели ЭВПТ, приведенной в [7].

В работе обоснована целесообразность применения малоразмерных автономных систем генерации на основе ВМКГ для запитки сильноточных вакуумных диодов и наносекундной зарядки коротких формирующих линий. Импульсная зарядка коротких формирующих линий, имеющих широкую область применения, позволила использовать в них в качестве диэлектрика полярные жидкости с высокой диэлектрической проницаемостью. В результате проведенных исследований достигнут гигаваттный уровень энергии и получено мегавольтное напряжение на высокоимпедансной нагрузке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chernykh Ye. V., Fortov V. Ye., Gorbachev K. V., et al. Series connected two cascades MCG MG-XI // Proc. of the 11th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, London, 10–14 Sept. 2006. Sarov: VNIIEF, 2007. P. 97–99.
2. Chernykh Ye. V., Gorbachev K. V., Lisichkin A. L., et al. Numerical simulation of cascade MCG // Proc. of the 11th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, London, 10–14 Sept. 2006. Sarov: VNIIEF, 2007. P. 391–394.

3. **Gurin Y. Ye., Kataev V. N., Korolev P. V., et al.** Autonomous magnetoexplosive generator of megavolt, 100 ns pulses // Proc. of the 8th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Tallhasse (USA), 18–23 Oct. 1998. Singapore: World Sci., 2004. P. 371–375.
4. **Pavlovskii A. I., Lyudaev R. Z., Kravchenko A. S., et al.** Investigation of disc magnetocumulative generators // Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, 3–7 July 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 331–336.
5. **Горбачев К. В., Нестеров Е. В., Черных Е. В.** Спирально-радиальный магнитокумулятивный генератор быстронарастающих импульсов тока // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 1. С. 68–74.
6. **Людаев Р. З., Кравченко А. С., Юрыжев А. С. и др.** Исследование спиральных магнитокумулятивных генераторов с одновременным иницированием цилиндрического заряда взрывчатого вещества по оси // Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам (МГ-7) “Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения”, Саров, 5–10 авг. 1996 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 310–314.
7. **Азаркевич Е. И., Коблучко А. В., Котов Ю. А. и др.** Расчетная модель электровзрывного прерывателя тока // Тез. докл. совместного заседания секций науч. советов АН СССР “Научные основы электрофизики и электроэнергетики”, Томск, 3–4 июля 1986 г. Томск: Том. гос. политехн. ин-т, 1986. С. 109–115.
8. **Горбачев К. В., Коровин С. Д., Месяц Г. А. и др.** Генерация мощных микроволновых импульсов резонансной релятивистской лампой обратной волны с системой питания на основе магнитокумулятивных генераторов // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 18. С. 22–29.
9. **Kitsanov S. A., Korovin S. D., Polevin S. D., et al.** S-band resonant BWO with 5 GW pulse power // Proc. of the 14th Intern. conf. on high power particle beams, Albuquerque (USA), 23–28 June 2002. S. l.: Amer. Inst. Phys., 2002. P. 255–258.
10. **Лисичкин А. Л., Нестеров Е. В., Строганов В. А.** Калориметр импульсного СВЧ-излучения // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 1. С. 82–84.
11. **Карпушин Ю. А., Нестеров Е. В., Черных Е. В., Золотых И. О.** Применение принципа МК для генерации мощного микроволнового излучения // Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам (МГ-7) “Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения”, Саров, 5–10 авг. 1996 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 918–923.
12. **Коростелев А. Ф., Седой В. С., Лучинский А. В.** Работа индуктивно-емкостного источника с электровзрывным прерывателем на емкостную нагрузку // Изв. вузов. Физика. 1995. № 12. С. 45–51.
13. **Горбачев К. В., Нестеров Е. В., Строганов В. А., Черных Е. В.** Применение магнитокумулятивных генераторов для быстрой зарядки формирующих линий // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 4. С. 70–79.

Поступила в редакцию 16/Х 2014 г.