

УДК 537.852:621.3.027.89

ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОКУМУЛЯТИВНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ДВОЙНЫМ ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

А. С. Кравченко, Ю. В. Вилков, А. С. Юрыжев,
М. М. Саиткулов, И. М. Бруснигин

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров

Разработан источник энергии на основе спирального магнитокумулятивного генератора с одновременным инициированием заряда взрывчатого вещества по оси. Генератор работает на двойной индуктивный накопитель энергии с узлами разрыва токового контура в каждом накопителе. Получены основные аналитические зависимости амплитуды и формы импульса от параметров двойного индуктивного накопителя энергии. В эксперименте с таким источником энергии на узле разрыва из электрически взрывающихся проводников получен импульс напряжения 770–800 кВ. Напряжение в точках возможного подключения нагрузки составило 1300–1350 кВ. Длительность фронта импульса напряжения от значения $0,1U_{\max}$ до значения $0,9U_{\max}$ не превышала 0,5 мкс.

Ключевые слова: магнитокумулятивный генератор, индуктивный накопитель, узел разрыва токового контура.

Магнитокумулятивные генераторы (МКГ) являются мощными источниками импульсов магнитной энергии. Диапазон изменений длительности и формы токовых импульсов, создаваемых МКГ, довольно узок и определяется скоростью детонации наиболее мощных взрывчатых веществ, применяемых в этих устройствах.

Для формирования импульсов тока различной формы и длительности в широком диапазоне нагрузок применяются различные схемы согласования параметров генератора с параметрами нагрузки. При этом для формирования на нагрузке импульса тока требуемых формы и длительности с мощностью, сравнимой или большей мощности МКГ, используются, например, такие методы, как индуктивная связь контура генератора с контуром нагрузки; накопление магнитной энергии, создаваемой МКГ, и коммутация ее на нагрузку с помощью узлов разрыва из электрически взрывающихся проводников (ЭВП) или взрывных размыкателей тока и разного рода плазменно-эрозионных размыкателей.

При использовании узлов разрыва из электрически взрывающихся медных проводников коэффициент усиления мощности источников тока не высок [1]. Поэтому для получения импульсов энергии большой мощности необходимо использовать быстродействующие МКГ. Одним из таких устройств является спиральный генератор с одновременным осевым инициированием заряда взрывчатых веществ — спиральный ОМКГ [2]. Этот генератор обладает высокой удельной мощностью при работе на нагрузку с достаточно большой индуктивностью [3].

Во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики проведены экспериментальные исследования спирального ОМКГ с внутренним диаметром спирали 115 мм и длиной рабочей части 330 мм. Генератор работал на нагрузку,

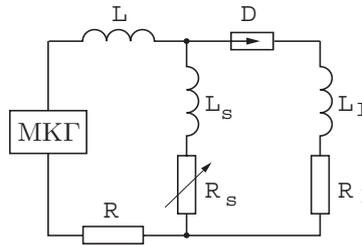


Рис. 1. Традиционная схема формирования импульсов тока

включавшую накопительную индуктивность и узел разрыва токового контура. В эксперименте с этим генератором на узле разрыва из ЭВП получен импульс тока мощностью более 90 ГВт. Напряжение на узле разрыва составило более 800 кВ, а напряжение на активном сопротивлении узла разрыва — свыше 900 кВ.

Результаты теоретических исследований источника энергии на основе спирального ОМКГ показывают, что на узле разрыва из электрически взрывающихся медных проводников могут быть получены импульсы напряжения свыше 1 МВ. Однако из-за высокого напряжения на выходе генератора при взрыве ЭВП нарушается его электрическая прочность, в результате чего снижаются значения выходных параметров устройства.

Для повышения электрической прочности выхода генератора требуется увеличить толщину изоляции витков спирали. Кроме того, существует вероятность возникновения пробойных процессов между витками спирали и лайнером генератора. Для предотвращения преждевременного развития этих процессов в конструкцию рассматриваемого генератора может быть введен дополнительный изолятор, расположенный под витками спирали. Все это приводит к увеличению невыведенной индуктивности и снижению мощности генератора. Поэтому при выборе толщины изоляции необходимо принимать во внимание оба вышеуказанных фактора.

Дальнейшее совершенствование источника энергии на основе спирального ОМКГ может быть достигнуто применением схемы с двойным индуктивным накопителем [4, 5]. Это позволит повысить максимальное напряжение в точках возможного подключения нагрузки без увеличения максимального напряжения на выходе генератора при сохранении максимальных параметров на узле разрыва токового контура.

Принципиальная схема двойного индуктивного накопителя энергии. Традиционная схема формирования импульсов тока требуемых формы и длительности приведена на рис. 1. Источник тока, в частности МКГ, создает в контуре с индуктивностью $L + L_s$ и активным сопротивлением $R + R_s$ ток I_0 . В некоторый момент времени сопротивление узла разрыва R_s скачкообразно увеличивается до максимального значения. Напряжение, возникшее на сопротивлении узла разрыва, приводит к срабатыванию неуправляемого разрядника D , в результате чего накопленная в индуктивности L энергия передается в нагрузку с параметрами L_l и R_l .

При формировании в нагрузке импульса тока с длительностью фронта много меньшей общей длительности максимальная мощность на активном сопротивлении нагрузки достигается при

$$R_l \approx R_s \frac{L + L_l}{L + L_s} + R \frac{L_s + L_l}{L + L_s}.$$

В этом случае значение максимальной мощности определяется из выражения

$$P_l = \frac{I_0^2 R_s}{4} \frac{(1 - RL_s/(R_s L))^2}{(1 + L_s/L)(1 + L_l/L + (L_l + L_s)R/(LR_s))} \xi^2,$$

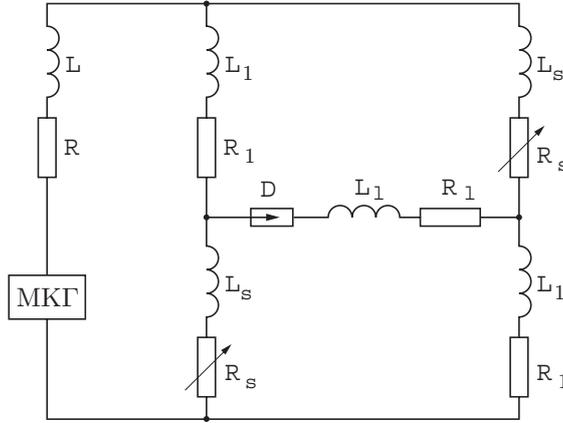


Рис. 2. Эквивалентная электротехническая схема двойного индуктивного накопителя энергии

где

$$\xi = \exp\left(\frac{\lambda - a}{2}t\right) - \exp\left(-\frac{\lambda + a}{2}t\right), \quad \lambda^2 = a^2 - 4b,$$

$$a = \frac{R_s}{L_s + LL_l/(L + L_l)} + \frac{R_l}{L_l + LL_s/(L + L_s)} + \frac{R}{L + L_sL_l/(L_s + L_l)},$$

$$b = \frac{RR_l + RR_s + R_sR_l}{LL_l + LL_s + L_sL_l}.$$

Напряжение на активном сопротивлении нагрузки при отборе максимальной мощности можно представить в виде

$$U_l = \frac{I_0 R_s}{2} \frac{1 - RL_s/(R_s L)}{1 + L_s/L} \xi.$$

В традиционной схеме индуктивного накопителя напряжение на активном сопротивлении нагрузки при отборе максимальной мощности не может превышать половины напряжения на узле разрыва в момент подключения нагрузки, а максимальная передаваемая мощность не превышает 25 % мощности на узле разрыва.

В работе [4] предложена принципиальная схема двойного индуктивного накопителя, в котором при отборе максимальной мощности максимальное напряжение, развиваемое на узле разрыва, может быть приложено к сопротивлению нагрузки. Эквивалентная электротехническая схема двойного индуктивного накопителя энергии приведена на рис. 2. Магнитная энергия, создаваемая источником тока с индуктивностью L и активным сопротивлением R , накапливается в двух индуктивных накопителях, включенных параллельно. Индуктивность и активное сопротивление каждого накопителя L_1 и R_1 соответственно. Последовательно с каждым индуктивным накопителем включен размыкатель (узел разрыва), активное сопротивление которого изменяется скачкообразно от нуля до R_s . Индуктивность размыкателя L_s . В момент достижения максимума напряжения на узлах разрыва срабатывает обостряющий разрядник D и в нагрузке с индуктивностью L_l и активным сопротивлением R_l возникает импульс тока I_l .

Максимальная мощность на активном сопротивлении нагрузки достигается при

$$R_l \approx 2R_s \frac{L_1 + L_l}{L_1 + 2L_l + L_s} + R_1 \frac{2L_s + L + L_l}{L_1 + 2L + L_s} + R \frac{L_1 + L_s + 2L_l}{L_1 + 2L + L_s}.$$

Как и в традиционном индуктивном накопителе, ее значение не превышает 25 % суммарной мощности на узлах разрыва. Однако напряжение на сопротивлении нагрузки в этом случае может достигать максимального значения напряжения на узлах разрыва. При $R_l \gg 2R_s$ значение импульса напряжения на нагрузке почти вдвое больше напряжения на каждом из узлов разрыва. Использование двойного индуктивного накопителя позволяет практически в два раза повысить напряжение на нагрузке без уменьшения передаваемой мощности.

Результаты эксперимента. Для подтверждения возможности создания магнитокумулятивного источника электромагнитных импульсов с двойным индуктивным накопителем энергии проведен эксперимент со спиральным ОМКГ. Длина спирали генератора 330 мм, внутренний радиус спирали по изоляции 57,5 мм, число витков спирали 24, наружный радиус центральной трубы 36 мм, наружный радиус цилиндра из взрывчатого вещества 32,5 мм. Начальная индуктивность генератора составила примерно 15 мкГн.

Начальное поле внутри генератора создавалось с помощью внешнего соленоида по схеме с перехватом потока. Параметры внешнего соленоида: длина 330 мм, средний радиус 75 мм, число витков 14. Индуктивность такого соленоида составляет приблизительно 8 мкГн.

Индуктивный накопитель был выполнен в виде двух одинаковых соленоидов. Каждый соленоид имел по пять витков. Средний диаметр соленоидов 250 мм, длина 725 мм. Индуктивность одного соленоида вместе с подводными концами равна 4,7 мкГн.

Узел разрыва токового контура состоял из двух блоков, для изготовления которых было использовано 50 проводников из медного провода диаметром 0,12 мм. Проводники длиной 1100 мм наматывались на два каркаса диаметром 110 мм на участке длиной 850 мм (по 25 проводников на один блок).

Индуктивность одного блока узла разрыва оценивается в 0,6 мкГн, индуктивность узла подсоединения устройства для формирования импульса напряжения к МКГ — 0,5 мкГн. Начальное значение активного сопротивления медных проводников одного блока составило 70 мОм, а их масса была равна 2,75 г.

Внешний вид источника энергии до эксперимента показан на рис. 3.

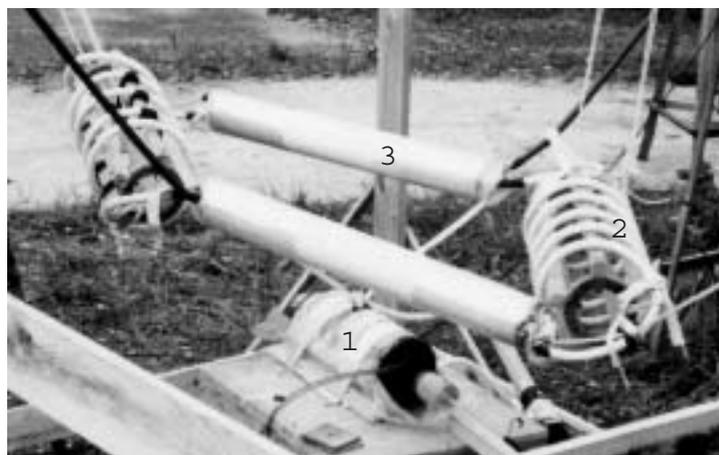


Рис. 3. Внешний вид источника энергии до эксперимента:

1 — спиральный ОМКГ; 2 — индуктивный накопитель; 3 — узел разрыва токового контура

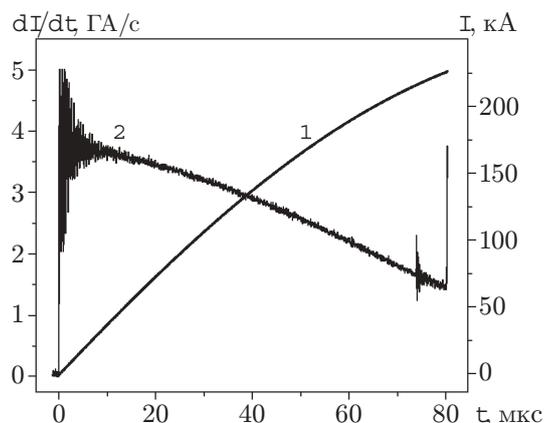


Рис. 4. Ток (1) и производная тока (2) в контуре внешнего соленоида

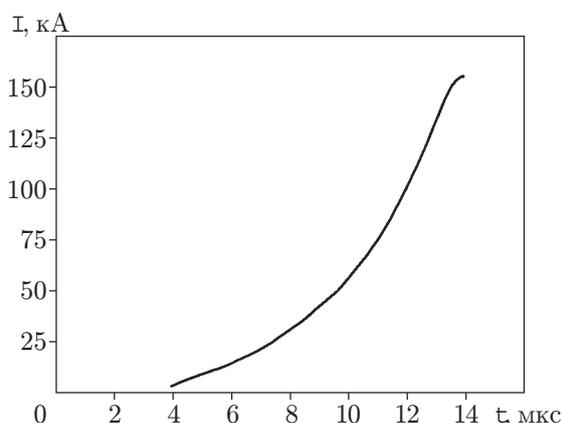


Рис. 5

Рис. 5. Ток в контуре генератора

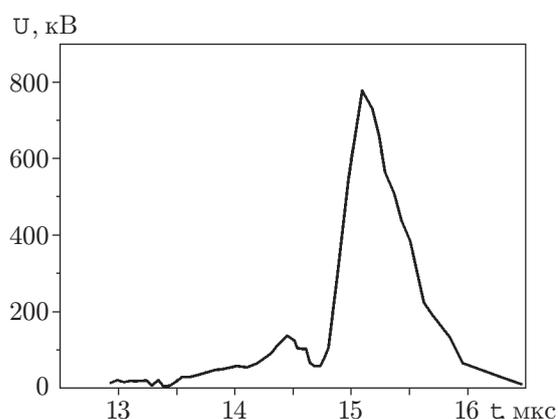


Рис. 6

Рис. 6. Осциллограмма напряжения на одном из блоков узла разрыва

Для создания начального поля использовалась конденсаторная батарея емкостью 900 мкФ и зарядным напряжением 35 кВ, индуктивность линии запитки составила 1 мкГн.

Осциллограмма производной тока по времени и полученная по ней кривая тока в контуре внешнего соленоида приведены на рис. 4. Значение тока во внешнем соленоиде к моменту начала работы генератора равнялось 225 кА. При этом время запитки составило 80 мкс.

На рис. 5 приведена кривая тока в контуре генератора, полученная в эксперименте. Максимальное значение тока в генераторе оценивается в 150–160 кА. На рис. 6 представлена осциллограмма напряжения на одном из блоков узла разрыва, на рис. 7 — осциллограмма напряжения в точках возможного подключения нагрузки (см. рис. 2). Максимальное значение напряжения на одном блоке узла разрыва составило 770–800 кВ, а напряжение в точках возможного подключения нагрузки — 1300–1350 кВ с фронтом менее 0,5 мкс от значения $0,1U_{\max}$ до значения $0,9U_{\max}$.

Полученные в эксперименте результаты хорошо согласуются с проведенными оценочными расчетами. Таким образом, экспериментально подтверждена возможность фор-

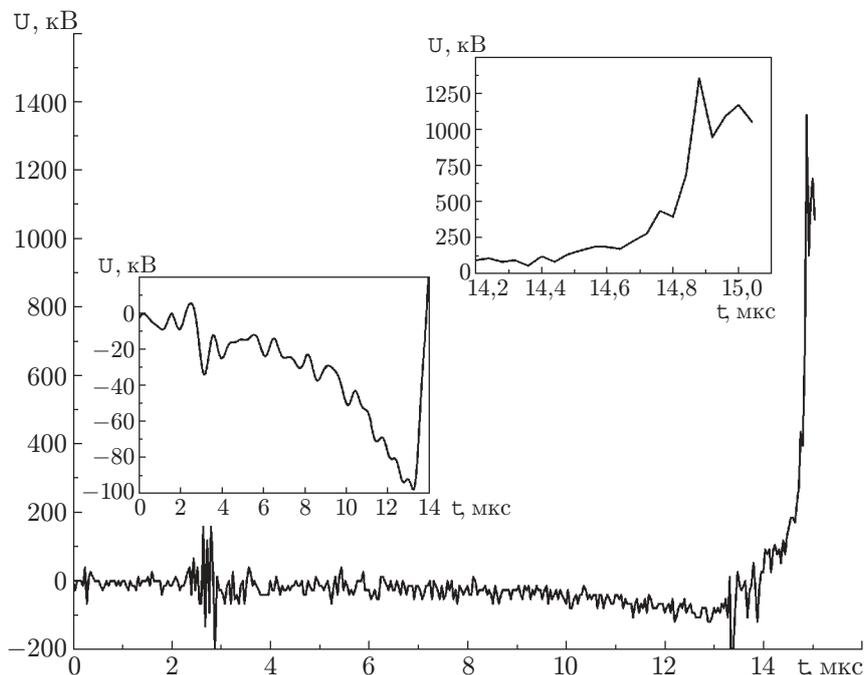


Рис. 7. Осциллограмма напряжения в точках возможного подключения нагрузки

мирования мощных импульсов энергии мегавольтного диапазона напряжений с помощью магнитокумулятивного генератора с двойным индуктивным накопителем энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов Ю. А., Лучинский А. В. Усилители мощности емкостного накопителя энергии прерывателем тока на электрически взрывааемых проволочках // Физика и техника мощных импульсных систем. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 189–211.
2. Shearer J. W., Abraham F. F., Aplin C. M., et al. Explosive-driven magnetic-field compression generators // J. Appl. Phys. 1968. V. 39, N 4. P. 2102–2116.
3. Людаев Р. З., Кравченко А. С., Юрыжев А. С. и др. Исследование спиральных магнитокумулятивных генераторов с одновременным инициированием цилиндрического заряда взрывчатого вещества по оси // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. Т. 1. С. 310–314.
4. А. с. 635605 СССР, МКИ Н 03 К3/53. Генератор высоковольтных импульсов на индуктивных накопителях / В. И. Кашинцов. Опубл. 30.11.78. Бюл. изобр. № 44.
5. Kravchenko A. S., Vilkov Yu. V., Selemir V. D. Magnetocumulative source of high-power pulses with double inductive energy storage // Proc. of the 12th IEEE Intern. pulsed power conf., Monterey, California, USA, 27–30 June, 1999 / Inst. of Electrical and Electronics Engineers, Inc. s. l., 1999. P. 732–734.

Поступила в редакцию 8/VII 2003 г.,
в окончательном варианте — 5/VIII 2003 г.