

Автономный магнитокумулятивный источник энергии

© В.А. Демидов, В.Д. Садунов, С.А. Казаков, А.С. Борискин, С.Н. Голосов, Ю.В. Власов, А.А. Утенков, М.В. Антипов, А.В. Блинов

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Нижегородская область, Россия
e-mail: demidov @ ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 16 ноября 2012 г.)

Среди современных источников с выходной энергией 1–10 кДж самыми компактными являются спиральные магнитокумулятивные генераторы (МКГ) с запиткой от взрывных пьезогенераторов (ВПГ). Взрывные ВПГ удачно сочетаются с МКГ по характеру действия и конструктивным параметрам, просты в эксплуатации, не нуждаются в преобразующих и коммутирующих устройствах. Представлены результаты работ по созданию автономного малогабаритного источника энергии на основе ВПГ и МКГ. За счет двухстороннего ударного нагружения пьезокерамического блока ВПГ энергия на выходе пьезогенератора достигает ~ 25 Дж и передается в спиральный МКГ с начальной индуктивностью ~ 1000 мкН. Конструктивно источник энергии выполняется как в виде моноблока объемом ~ 2 дм³, так и в виде двух отдельных устройств, соединенных высоковольтным кабелем.

Введение

Создание начального магнитного поля в магнитокумулятивных генераторах (МКГ) обеспечивается, как правило, накопителями энергии на основе конденсаторов. Однако при разработке автономных генераторов возникают проблемы, связанные с массогабаритными и эксплуатационными характеристиками емкостных систем.

Эти трудности снимаются, если запитка МКГ осуществляется от ВПГ. Для наращивания энергии автономных устройств могут применяться каскадные системы усиления энергии, состоящие из нескольких последовательно работающих МКГ, связанных высоковольтными трансформаторами. В этом случае можно создавать магнитокумулятивные источники на очень большие выходные энергии.

В работе [1] нами было продемонстрировано устройство, состоящее из ВПГ, спирального МКГ с внутренним диаметром 50 мм, трансформатора и спирального МКГ диаметром 100 мм. При выходной энергии ВПГ ~ 6 Дж в опыте в нагрузке ~ 30 нН был получен ток 5.3 МА, магнитная энергия ~ 0.4 МДж. Для генерирования большей энергии необходимо применение следующего МКГ с трансформатором.

Эффективность автономных каскадных систем усиления энергии повышается с ростом выходной энергии ВПГ. В настоящей работе приводятся результаты исследования ВПГ с выходной энергией до 25 Дж и результаты эксперимента по запитке от этого ВПГ высокоиндуктивного спирального МКГ.

ВПГ с двухсторонним нагружением блока пьезокерамики

Взрывной пьезогенератор, представляет собой устройство, обеспечивающее преобразование механической

энергии ударной волны (УВ) в электрическую энергию. Он состоит из блока пьезокерамики (ПК) и генератора УВ. Анализ возможных вариантов конструкций ВПГ, предназначенных для начальной запитки ВМГ, показал, что могут быть реализованы следующие схемы их построения [2]:

- с прямым подключением ВПГ к контуру ВМГ,
- с дополнительным конденсатором, когда время работы ВПГ (T), совпадает с временем запитки ВМГ (T_1),
- с дополнительным конденсатором, когда время работы ВПГ меньше времени запитки ВМГ.

Наиболее простой является схема с прямым подключением ВПГ к контуру ВМГ. Эта схема может быть реализована в случае использования ПК с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ , когда выполняется условие $z_1/z_0 \leq 1$, где z_0 — высота блока пластин ПК, z_1 — высота части блока ПК, в которой происходит генерация энергии.

Анализ работы ВПГ с односторонним нагружением блока ПК [2] показал, что для генерирования энергии в контуре ВМГ используется только часть объема блока $z_1/z_0 \approx 50\%$. Остальная часть играет роль накопительного конденсатора, регулирующего время запитки индуктивной нагрузки $T_1 = \pi\sqrt{L_1 C_{PC}}$ (L_1 — индуктивность нагрузки, C_{PC} — емкость ПК) до энергии W_0 . Эта особенность конструкции ВПГ позволяет использовать оставшуюся часть блока ПК для генерирования дополнительной энергии за счет ударно-волнового нагружения блока ПК с противоположного торца.

Устройство ВПГ с двухсторонним нагружением блока ПК показано на рис. 1. Здесь первый генератор ударной волны (ГУВ) аналогичен по конструкции ГУВ для ВПГ с односторонним нагружением блока ПК [2] и формирует плоскую ударную волну УВ₁. При работе второго ГУВ плоский алюминиевый лайнер разгоняется продуктами взрыва слоя взрывчатого вещества (ВВ), инициируемого

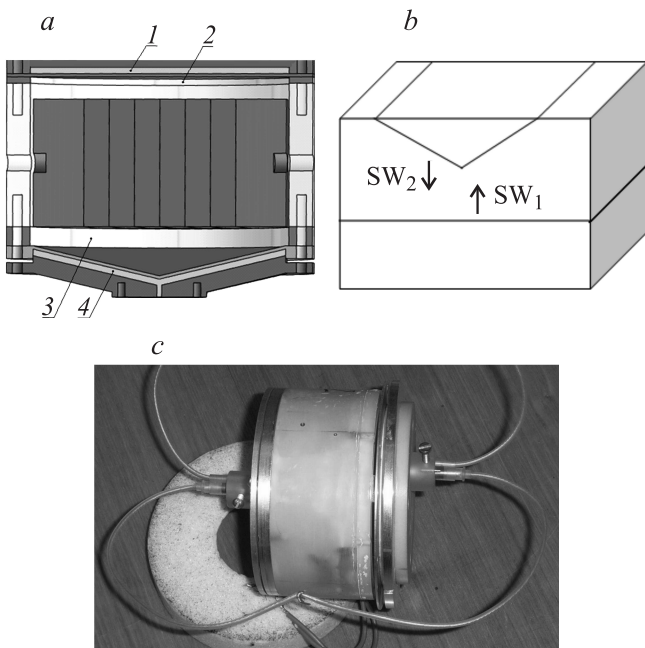


Рис. 1. ВПГ с двухсторонним нагружением блока ПК: *a* — принципиальная конструкция, 1 — детонационный распределитель, 2, 3 — заряды ВВ, 4 — формирователь плоской ударной волны; *b* — схема распространения ударных волн, *c* — внешний вид.

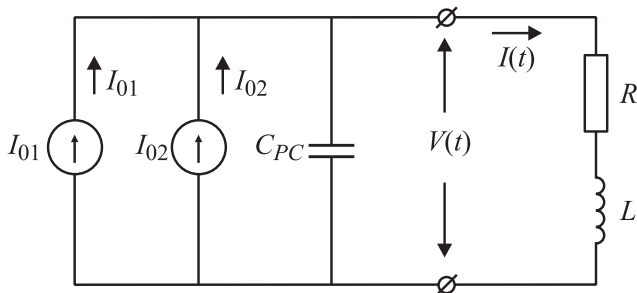


Рис. 2. Эквивалентная схема ВПГ с двухсторонним нагружением блока ПК.

с помощью детонационного распределителя. В результате этого в блоке ПК дополнительно формируется клиновидная УВ₂, движущаяся навстречу УВ₁ (рис. 1, *b*).

Нагружение блока ПК ударной волной УВ₂ производится с задержкой на время $t_d \geq T_V = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_I C_{PC}}$ по отношению к УВ₁. Форма фронта второй УВ и время t_2 , выбираются таким образом, чтобы выполнялось условие $V(t) \leq V_0 = I_0 \sqrt{L_I / C_{PC}}$.

Эквивалентная электрическая схема рассматриваемого ВПГ (рис. 2) содержит два генератора тока. Первый из них моделирует процесс ударной деполяризации блока ПК плоской УВ₁, второй — клиновидной УВ₂. Первый генератор включается в работу в момент времени $t = 0$, второй — в момент времени $t = t_d$.

Электрические процессы в цепи ВПГ для моментов времени $t \leq t_d$ и $t \geq t_d$ описываются уравнениями

$$LC\ddot{I} + RC\dot{I} + I = I_{01}, \quad (1)$$

$$LC\ddot{I} + RC\dot{I} + I = I_{01} + I_{02}, \quad (2)$$

где $I_{01} = \text{const}$, $I_{02}(t) = I_{01}(1 + t/\Delta t_{EH})$, $\Delta t_{EH} = y_0/2D$ (рис. 4), D — скорость детонации.

Для случая $R = 0$ решения уравнений (1) и (2) имеют вид

$$I(t) = I_0(1 - \cos \omega t) + I_0 \left(\frac{t}{\Delta t_{VV}} - \frac{t_d}{\Delta t_{EH}} \cos \omega(t - t_d) - \frac{1}{\omega \Delta t_{EH}} \sin \omega(t - t_d) \right), \quad (3)$$

$$V(t) = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \left\{ \sin \omega t + \left(\frac{1}{\omega \Delta t_{EH}} + \frac{t_d}{\Delta t_{EH}} \sin \omega(t - t_d) - \frac{1}{\omega \Delta t_{EH}} \cos \omega(t - t_d) \right) \right\}. \quad (4)$$

Работа ВПГ с двухсторонним нагружением блока ПК проверена экспериментально. Результаты, полученные в опытах с низкоимпедансной нагрузкой ($L_I = 0.3 \mu\text{H}$, $R_I \approx 1 \Omega$) свидетельствует о том, что расчетная модель адекватно описывает работу ВПГ (рис. 3).

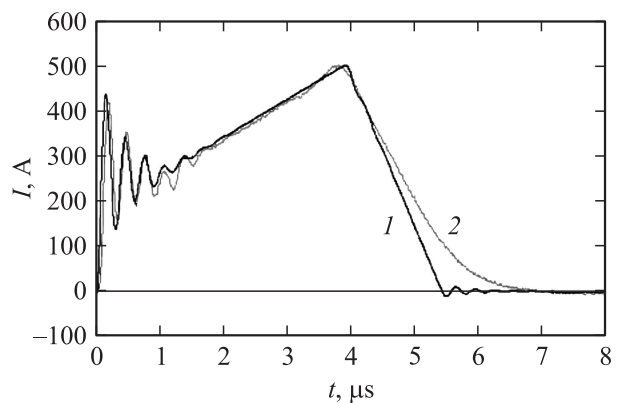


Рис. 3. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости тока ВПГ от времени.

Таблица 1. Результаты испытаний ВПГ с двухсторонним нагружением блока ПК на индуктивную нагрузку $120 \mu\text{H}$

№ опыта	L_I , μH	C_{PC} , nF	E_0 , kV/mm	I_{max} , А	U_0 , kV	W_0 , J
1	120	15.6	2.9	484	17.2	14
2	120	15.6	3.6	505	21.6	15

Здесь E_0 — напряженность электрического поля в ПК; I_{max} , W_0 — максимальные значения тока и энергии в нагрузке соответственно, U_0 — максимальное напряжение на нагрузке.

В двух опытах с индуктивной нагрузкой $L_l = 120 \mu\text{H}$, имитирующей спиральный ВМГ, получена энергия, более чем в два раза превышающая энергию, обеспечиваемую ВПГ с односторонним нагружением блока ПК [1,2]. Результаты этих экспериментов представлены в табл. 1.

ВПГ с нагружением ПК встречными клиновидными УВ

При анализе работы ВПГ с двухсторонним нагружением плоской и клиновидной УВ было предположено, что дальнейшего повышения выходной энергии ВПГ можно достичь при замене плосковолнового ГУВ на клиновидный, подобный уже используемому в конструкции ВПГ.

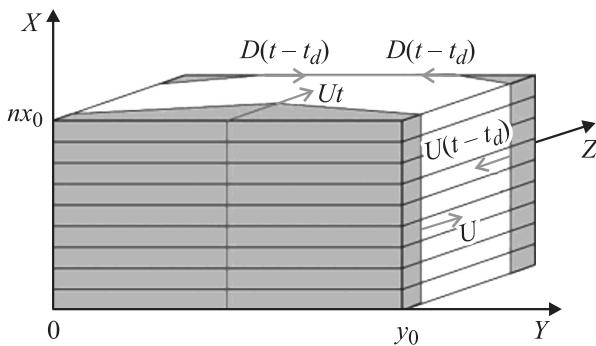


Рис. 4. Схема ВПГ с блоком ПК, нагружаемым встречными (расходящаяся и сходящаяся) клиновидными ударными волнами.

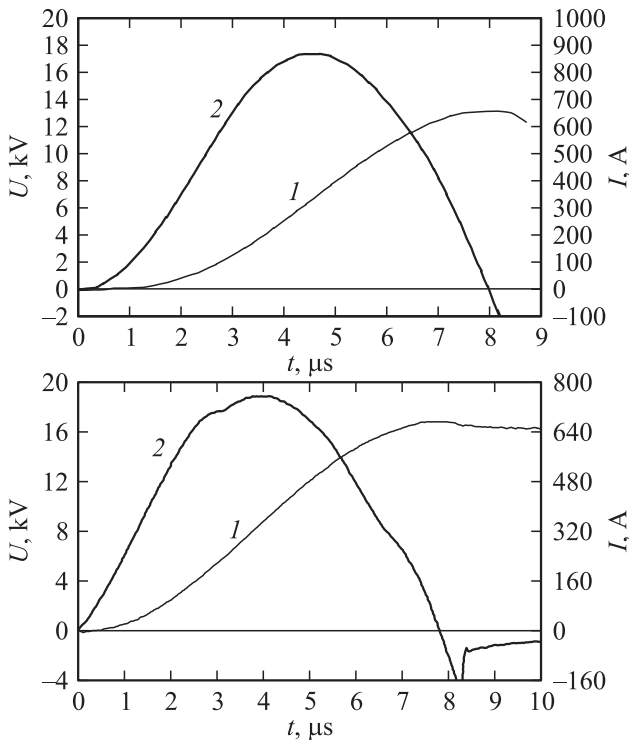


Рис. 5. Расчетные (а) и экспериментальные (б) импульсы тока (1) и напряжения (2).

Таблица 2. Результаты эксперимента и расчета ВПГ с блоками ПК, нагружаемыми встречными клиновидными ударными волнами при работе на нагрузки 120 и 1050 μH соответственно

	L_l , μH	C_{PC} , nF	E_0 , kV/mm	I_{max} , A	U_0 , kV	W_0 , J	Объем блока ПК, cm^3	Объем ВПГ, cm^3
Эксперимент	120	23.9	2.4	655	18.9	25.7	112	570
Расчет	1050	2.04	1.9	210	50	23	115	

Здесь E_0 — напряженность электрического поля в ПК, I_{max} , W_0 — максимальные значения тока и энергии в нагрузке соответственно, U_0 — максимальное напряжение на нагрузке.

Это позволяет перейти от П-образного импульса тока деполяризации блока ПК с амплитудой I_0 к импульсу тока, передний фронт которого нарастает по линейному закону $I(t) = tI_0/T$, и снизить за счет этого величину электрического поля в ПК. Схематично такой ВПГ показан на рис. 4.

С целью подтверждения работоспособности ВПГ с двухклинным нагружением блока ПК был проведен опыт по запитке индуктивной нагрузки $L_l = 120 \mu\text{H}$. Расчетные и экспериментальные импульсы тока и напряжения показаны на рис. 5. Результаты эксперимента представлены также в табл. 2. В этой же таблице приведены расчетные данные подобного ВПГ, работающего на нагрузку 1050 μH .

Результаты расчетов и экспериментов с ВПГ с двухклинным нагружением блока ПК показали возможность дальнейшего повышения энергии по сравнению с ранними ВПГ с односторонним нагружением блока ПК. Увеличение энергии ВПГ сопровождается повышением выходного напряжения. Особенно высоким оно становится при запитке высокоиндуктивных ($\sim 1000 \mu\text{H}$) нагрузок.

Эксперимент с МКГ

В опыте от ВПГ запитывался спиральный МКГ-60 со статором диаметром 60 мм. Этот генератор ранее применялся совместно с электровзрывным размыкателем тока для формирования высоковольтных импульсов в сильноточных диодах [3]. Соленоид МКГ-60 имеет длину 195 мм, индуктивность — 1050 μH , активное сопротивление $\sim 8 \Omega$. Алюминиевый лайнер имеет цилиндрическую и коническую части, масса заряда ВВ равна 260 г.

Эскиз ВПГ с двухсторонним нагружением блока ПК встречными клиновидными ударными волнами представлен на рис. 6. Электрический блок 5 ВПГ содержит 6 пластин из пьезокерамики ЦТС-19 с размерами $8 \times 40 \times 60 \text{ mm}$. Масса ВВ в генераторе $\sim 40 \text{ g}$. Наружный диаметр и высота ВПГ составляют $\sim 90 \text{ mm}$. Для исключения пробоев электрический блок 5 с высоковольтными проводами 8 размещался в контейнере 6 с трансформаторным маслом 7.

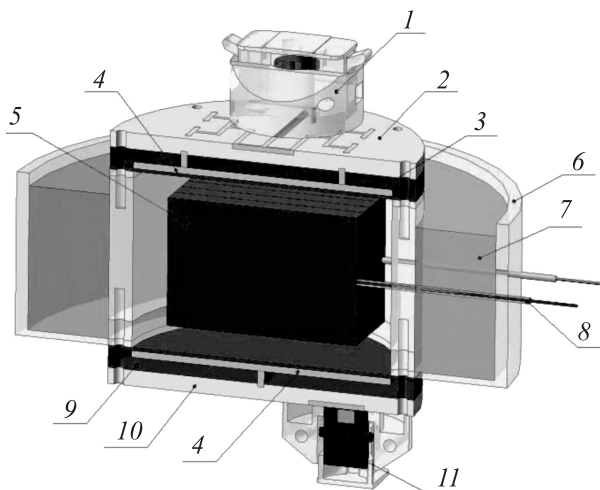


Рис. 6. Эскиз пьезогенератора для МКГ-60. 1, 11 — розетки под электродетонаторы; 2, 3, 9, 10 — детонационные распределители; 4 — диски из ВВ; 5 — блок пьезокерамики; 6 — контейнер; 7 — масло трансформаторное; 8 — высоковольтный провод.

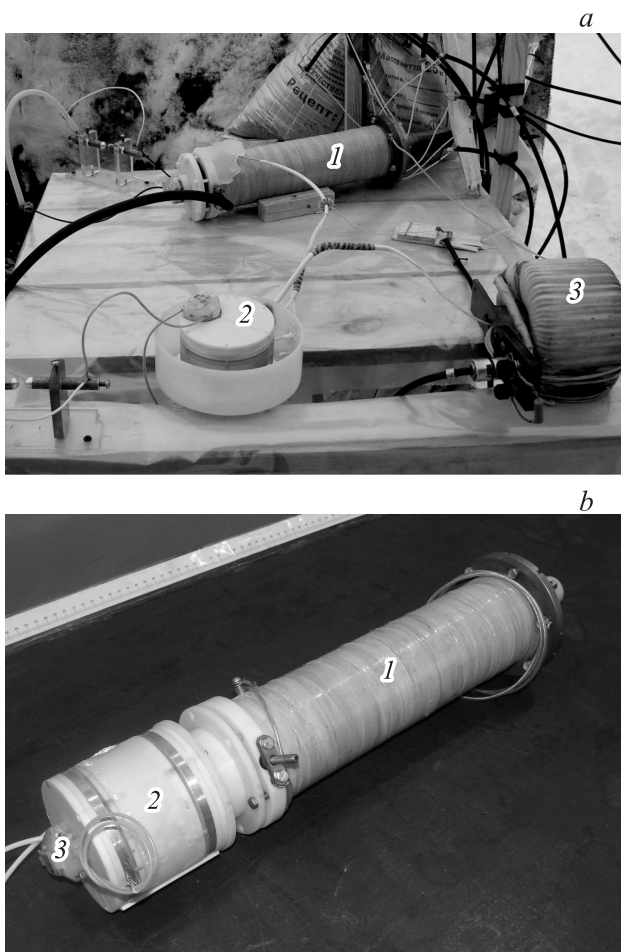


Рис. 7. *a* — эксперимент по отработке автономного источника энергии. 1 — МКГ, 2 — ВПГ, 3 — пояс Роговского. *b* — автономный источник энергии в исполнении „моноблок“. 1 — МКГ, 2 — ВПГ, 3 — электродетонатор.

Как видно из табл. 2, выходное напряжение ВПГ с нагрузкой $1050 \mu\text{H}$ составляет $\sim 50 \text{ kV}$. При запитке МКГ-60 от ВПГ были приняты меры по повышению электрической прочности входа спирального генератора. За счет применения компаунда, изменения конфигурации наружной поверхности статора генератора и наполнения его внутреннего объема газом SF_6 удалось повысить электропрочность МКГ-60 в ~ 2 раза и довести ее до $\sim 70 \text{ kV}$.

Конструктивно ВПГ и МКГ-60 могут располагаться раздельно или могут быть объединены в моноблок. Так, в эксперименте по отработке автономного источника энергии ВПГ и МКГ-60 размещались раздельно (рис. 7, *a*), что было связано с необходимостью сохранения измерительных датчиков в опыте. В этом случае использовалось три электродетонатора: два для подрыва ВПГ и один для подрыва МКГ-60.

При изготовлении устройства в виде моноблока (рис. 7, *b*) согласование работы ВПГ и МКГ-60 во времени осуществляется детонационным распределителем на основе пластического ВВ. В таком варианте срабатывание генераторов ударных волн в ВПГ и работа МКГ-60 осуществляются подрывом одного электродетонатора. Заданные времена начала работы ВПГ и МКГ-60 обеспечиваются с точностью не хуже $0.3 \mu\text{s}$.

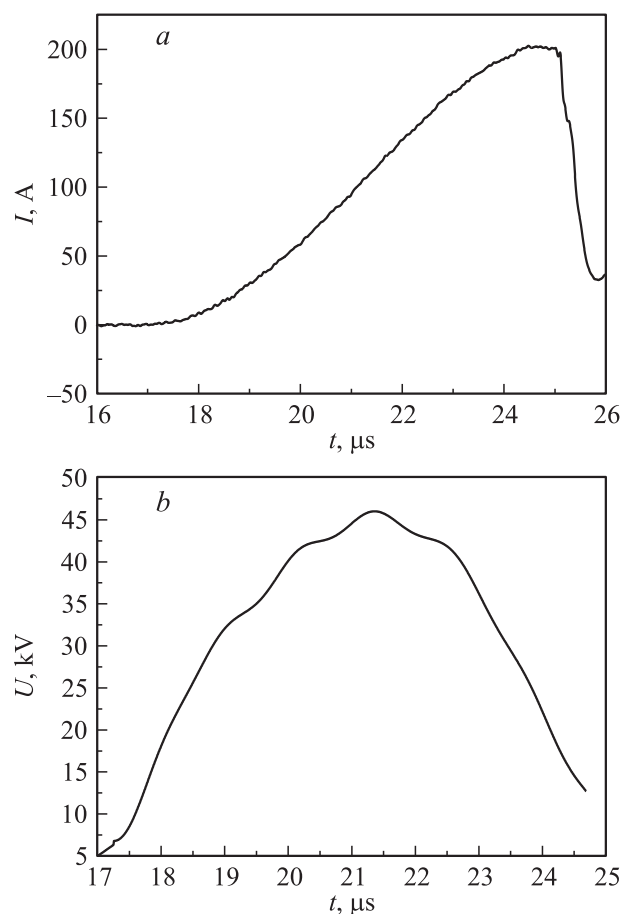


Рис. 8. Осциллограммы тока (*a*) и напряжения на выходе ВПГ (*b*).

При испытании автономного источника энергии в исполнении „моноблок“ МКГ-60 работал на нагрузку $\sim 1.2 \mu\text{H}$. В качестве нагрузки использовался эквивалент электровзрывного размыкателя тока [3], соединенный с МКГ-60 высоковольтным кабелем длиной 400 mm.

Осциллограммы тока и напряжения на выходе ВПГ-1050, полученные в опыте, представлены на рис. 8. ВПГ обеспечил запитку МКГ-60 энергией $\sim 23 \text{ J}$. Максимальный ток на выходе ВПГ составил $\sim 210 \text{ A}$, а максимальное напряжение 46 kV. Коэффициент усиления энергии МКГ-60, как и в [3], равен ~ 43 .

Выходные характеристики ВПГ-1050 соответствуют результатам его предварительных расчетов (табл. 2). Эксперимент подтвердил работоспособность автономного источника энергии при напряжении на выходе ВПГ $\sim 50 \text{ kV}$.

Заключение

Применение двухстороннего нагружения блока пьезокерамики позволяет в несколько раз увеличить выходную энергию ВПГ при работе на индуктивные нагрузки 100–1000 μH . Наилучший эффект (запасаемая энергия $\sim 25 \text{ J}$) наблюдается в ПГ со встречными (расходящейся и сходящейся) клиновидными ударными волнами. Использование такого ВПГ для запитки высокоиндуктивного магнитокумулятивного генератора МКГ-60 позволило создать автономный источник энергоемкостью $\sim 1 \text{ kJ}$ (нагрузка $\sim 1.2 \mu\text{H}$) объемом $\sim 2 \text{ dm}^3$. Конструктивно устройство выполняется как в виде моноблока, так и в виде двух отдельных блоков, электрически соединенных между собой.

Областью применения автономного источника энергии является запитка малогабаритных сильноточных вакуумных диодов. Другой областью применения может стать создание каскадных систем усиления энергии для питания более мощных МКГ.

Список литературы

- [1] Demidov V.A., Sadunov V.D., Kazakov S.A. et al. Helical Cascade FCG Powered by Piezogenerator // In: Digest of Technical Papers 11th IEEE International Pulsed Power Conference / Ed. G. Cooperstein and I. Vitkovitsky. Baltimore, Maryland, 1997. P. 1476–1481.
- [2] Demidov V.A., Sadunov V.D., Kazakov S.A. et al. Piezoceramic Power Supply of EMG // In: Megagauss and Megaampere Pulse Technology and Applications / Ed. V.K. Chernyshev, V.D. Selemir, L.N. Plyashkevich. Sarov: VNIIEF, 1997. P. 336–339.
- [3] Demidov V.A., Boriskin A.S., Stepanov N.V. et al. Electro-Exploded Current Opening Switch Powered from Magneto-Cumulative Generator // In: Megagauss X / Ed. M. von Ortenberg. Berlin: Humboldt University at Berlin, 2005. P. 94–98.