

Новая конденсаторно-коммутаторная сборка для мощных импульсных генераторов

И. В. Лавринович, Д. В. Молчанов, Н. В. Жарова

Разработана и изготовлена новая конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕIcsa160-0.1», электрические параметры которой позволяют получить на согласованной нагрузке 0,8 Ом импульс мощности со временем нарастания 100 нс и амплитудой 10 ГВт. Представлены результаты сравнительного анализа, показавшие перспективность использования «НСЕIcsa160-0.1» для построения новых компактных быстрых ЛТД-ступеней (от англ. Liner Transformer Driver) с высокими удельными показателями.

Ключевые слова: конденсаторно-коммутаторная сборка, высоковольтный импульсный конденсатор, сильноточный коммутатор, газовый разрядник, быстрая ЛТД-ступень, Liner Transformer Driver

Введение

Современные импульсные генераторы терраваттного уровня мощности (ZR, Ангара-5-1, Гамма-4 и др.), обеспечивающие передачу энергии в нагрузку за времена ~ 100 нс, построены по традиционной многомодульной технологии. Каждый модуль включает первичный накопитель энергии в виде генератора Маркса, систему обострения мощности в виде промежуточных емкостных накопителей на основе водонаполненных линий, мегавольтный разрядник и передающую линию. Наличие дополнительной системы обострения уменьшает эффективность передачи энергии и мощности в нагрузку, а применение коммутаторов с мегавольтным рабочим напряжением и лазерной системой запуска снижает надёжность, что также существенно усложняет и удорожает эксплуатацию установки в целом.

Альтернативным подходом к построению мощных импульсных генераторов, который активно развивается в настоящее время, является применение генераторов на основе емкостных накопителей с быстрым выводом энергии, способных без дополнительных систем обострения передать в нагрузку импульс мощности с временем нарастания менее 100 нс. Такой ёмкостной накопитель с

быстрым выводом энергии представляет собой конденсаторно-коммутаторную сборку (ККС), которая состоит из одного или нескольких малоиндуктивных высоковольтных импульсных конденсаторов и малоиндуктивного коммутатора, который обеспечивает включение конденсаторов на нагрузку и быструю передачу запасенной в них энергии. Так как электрические параметры ККС, а также её конструкция и массогабаритные показатели напрямую влияют на архитектуру и выходные параметры всего генератора, то уже активно ведутся исследования, направленные как на изучение и улучшение технических характеристик уже разработанных ККС и её отдельных элементов, так и на разработку новых ККС.

Целью данной работы являлась разработка и исследование новой ККС, которая была бы сравнима с лучшими ККС по удельной мощности, но при этом значительно превосходила бы их по показателю абсолютной выходной мощности. Такое направление работы представляется весьма актуальным и востребованным в свете развития и создания современных сверхмощных электрофизических установок (например, для реализации инерционного управляемого термоядерного синтеза – УТС).

Анализ существующих ККС

По конструктивному исполнению ККС можно условно разделить на два типа. ККС 1-го типа (сокращенно будем их называть ККС-1) состоят из двух высоковольтных импульсных конденсаторов прямоугольной формы с выводами, расположенными с разных торцов корпуса (см. рис. 1). Конденсаторы заряжаются напряжением одинаковой амплитуды U_0 , но противополо-

Лавринович Иван Валериевич, н.с., к.т.н.
Молчанов Денис Викторович, инженер-исследователь, аспирант.
Жарова Наталья Викторовна, инженер.
Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3.
Тел. (3822)492-335. E-mail: lavgivan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2018 г.

© Лавринович И. В., Молчанов Д. В., Жарова Н. В., 2018

ложной полярности. Конденсаторы разделены плоским изолятором и одними выводами включены на передающую линию или нагрузку. Со стороны противоположных потенциальных выводов конденсаторов располагается коммутатор – газовый разрядник. Разрядник подключен к выводам конденсаторов своими основными электродами. Разрядник также имеет управляющий электрод, вывод или выводы которого расположены с противоположной от конденсаторов стороны.

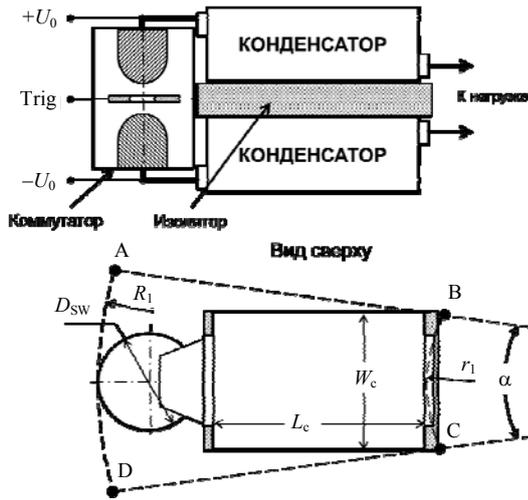


Рис. 1. Схематичное изображение конструкции ККС-1.

Для данного типа ККС разработано несколько различных разрядников, среди которых можно выделить многоззорный «FAST LTD» [1],

разработанный в ИСЭ СО РАН, и двухззорные «L3» и «Kintech 2» [2], разработанные в США. Все перечисленные разрядники имеют экспериментально доказанный значительный ресурс работы на уровне более 5000 срабатываний при низкой вероятности самопробоя, а также малые время (~40 нс) и разброс срабатывания ($\sigma < \pm 2$ нс), что позволяет применять их в импульсных питающих системах, таких как ЛТД-ступени (от англ. Liner Transformer Driver) и построенные на их основе ЛТД-генераторы тераваттного уровня мощности.

Однако разрядники ККС-1 имеют между собой ряд конструктивных и эксплуатационных отличий, таких как рабочее давление газа, количество и размер газовых промежутков, размеры электродов и корпуса, что приводит к отличию в их индуктивности и, соответственно, полной индуктивности разрядного контура ККС L_0 . В табл. 1 представлены параметры ККС-1, состоящих из двух конденсаторов емкостью 40 нФ, произведённых компанией General Atomics, США.

ККС 2-го типа (ККС-2) состоит из одного высоковольтного импульсного конденсатора коаксиальной формы (рис. 2), по центру которого располагается коммутатор – трёхэлектродный газовый разрядник тригatronного типа, управляемый по принципу искажения поля. Потенциальный вывод конденсатора соединен с одним из основных электродов разрядника, а другой вывод конденсатора и другой основной электрод разрядника подключены к передающей линии или нагрузке.

Таблица 1

Электрические и мощностные параметры различных ККС

Параметр	40нФ + «FAST LTD»	40 нФ + «L3»	40 нФ + «Kintech2»	«HCEIcap 80-0.25»	«HCEI csa160-0.1»
Тип ККС	ККС-1			ККС-2	гибридный
Полное напряжение U_0 , кВ	200	200	200	80	160
Ёмкость ККС C_0 , нФ	20	20	20	250	110
Индуктивность ККС L_0 , нГн	185	155	139	30	62
Мощность P_{max} , ГВт	3,95	4,3	4,55	5,5	10,2
Удельная мощность p_{max} , кВт/см ³	565	870	1100	850	910

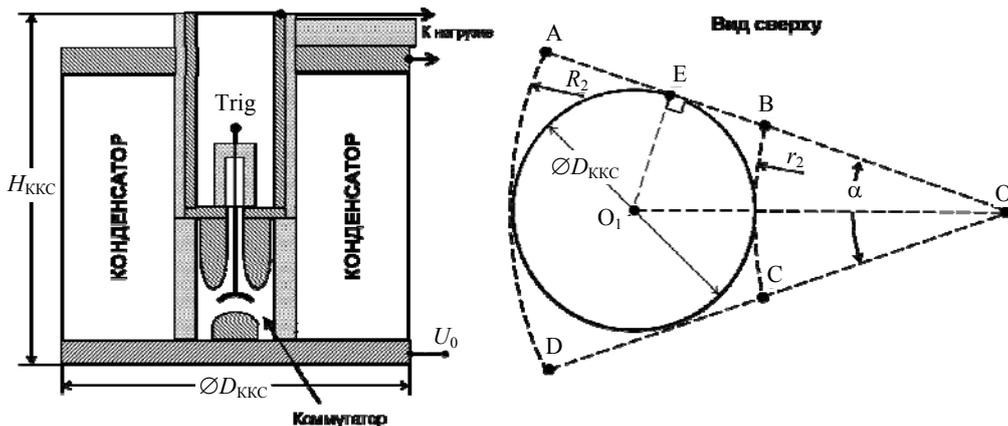


Рис. 2. Схематичное изображение конструкции ККС-2.

Различные модификации ККС-2, отличающиеся такими параметрами, как рабочее напряжение, запасаемая энергия, выходная мощность, габаритные размеры и вес, были разработаны в ИСЭ СО РАН [3–6]. Благодаря размещению разрядника непосредственно внутри конденсатора, они имеют меньшую, в сравнении с ККС-1, индуктивность разрядного контура (например, ККС «НСЕIсар 80-0.25», см. табл. 1), что позволяет использовать конденсаторы большей емкости при тех же временах вывода энергии. В результате такие сборки имеют меньшее волновое сопротивление и больший номинальный ток и выходную мощность, что предопределило их использование в различных компактных сильнотоковых генераторах небольшой мощности [5–10]. Вместе с тем, применение ККС-2 для построения более мощных генераторов, построенных на основе ЛТД-ступеней с большим количеством ККС, ограничено из-за их средних показателей по удельной выходной мощности. Перспектива применения ККС-1 в мощных импульсных генераторах петаваттного уровня, востребованных для реализации инерционного УТС, также не очевидна. Всё это есть следствие их небольшой выходной мощности, которая физически ограничена большой индуктивностью разрядного контура и близка к предельному значению для данного типа ККС.

Таким образом, разработка новой ККС, которая была бы сравнима с ККС-1 по удельной мощности, но при этом значительно превосходила существующие ККС по показателю абсолютной выходной мощности, является, как уже сказано, весьма актуальной и востребованной задачей.

Новая конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕIcsa160-0.1»

В ИСЭ СО РАН разработана новая конденсаторно-коммутаторная сборка «НСЕIcsa160-0.1», которая представляет собой некий «гибрид» между ККС 1-го и 2-го типов.

«НСЕIcsa160-0.1» состоит из двух коаксиальных конденсаторов (рис. 3), по центру которых располагается газовый разрядник, как у ККС-2. При этом конденсаторы заряжаются напряжением разной полярности и коммутируются одним разрядником, как и у ККС-1.

Испытания «НСЕIcsa160-0.1» в режиме короткого замыкания при пониженном зарядном напряжении ±50 кВ позволили определить период собственных колебаний разрядного контура, который составил $T_0 = 519$ нс, и вычислить полную индуктивность L_0 разрядного контура ККС:

$L_0 \approx (T_0/2\pi)^2/C_0 = 62$ нГн, где $C_0 = C_k/2$, а $C_k = 220$ нФ – емкость конденсаторов, измеренная с помощью RLC-метра.

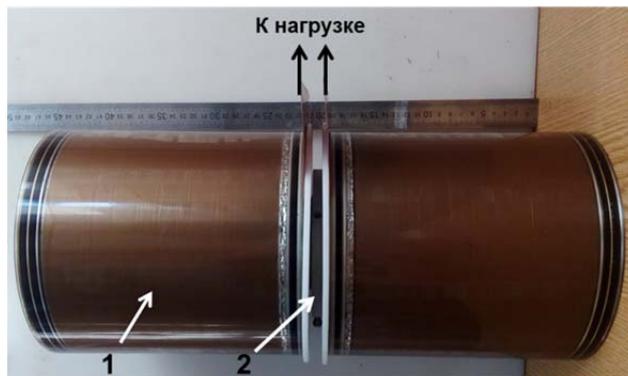


Рис. 3. Фото ККС «НСЕIcsa160-0.1». 1– конденсатор, 2 – коммутатор.

Зная электрические параметры ККС, т. е. U_0 , C_0 , L_0 , и её габаритные размеры, нетрудно определить интересующие нас проектные параметры, а именно, абсолютную максимальную мощность P_{max} и удельную выходную мощность p_{max} .

Максимальная выходная мощность сборки может быть рассчитана с помощью следующего выражения:

$$P_{max} = \frac{0,3U_0^2}{\sqrt{L_0/C_0}}. \tag{1}$$

Выражение (1) является оптимистичной оценкой выходной мощности, так как не учитывает потери в активном сопротивлении разрядного контура ККС и потери в коммутаторе. Тем не менее, мощность других ККС определялась также с помощью выражения (1), что позволяет адекватно сравнивать их по этому показателю.

Удельная максимальная выходная мощность ККС определяется как максимальная выходная мощность P_{max} , отнесённая к её объёму, т. е. имеем формулу:

$$p_{max} = \frac{P_{max}}{V_0}. \tag{2}$$

Рассчитанные значения P_{max} и p_{max} также представлены в табл. 1.

Обсуждение

Как видно из (табл. 1), разработанная ККС «НСЕIcsa160-0.1» имеет выходную мощность, почти вдвое превышающую прочие ККС, и сравниваемую с ними удельную мощность. Поскольку применение ККС цилиндрической формы в ЛТД-ступенях ранее не рассматривалось, то проведём

небольшой анализ для оценки эффективности и целесообразности построения таких ЛТД-ступеней.

Конструкция ЛТД-ступени предполагает равномерное размещение нескольких идентичных ККС в количестве $N_{\text{ККС}}$ вокруг общей нагрузки. Наибольшие удельные показатели будут достигаться, если ККС будут расположены на окружности r , обеспечивающей максимально близкое расстояние между соседними ККС. В этом случае можно считать, что ККС занимает часть объёма ЛТД-ступени, которая может быть найдена как произведение высоты ККС $H_{\text{ККС}}$ на площадь сектора ABCD $S_{\text{ККС}}$ (см. рис. 1 и рис. 2), который описывает ККС:

$$V_{\text{ККС}} = H_{\text{ККС}} \times S_{\text{ККС}}. \quad (3)$$

Для сборки на базе разрядника «FAST LTD» высоту сборки приняли равной высоте разрядника $H_{\text{ККС}} = 15,9$ см. Для остальных сборок, построенных на базе более компактных разрядников «L3» и «Kintech 2», высоту $H_{\text{ККС}}$ приняли равной сумме высот двух конденсаторов ($H_{\text{С}} = 5,8$ см) и разделяющего их изолятора ($H_{\text{И}} = 1$ см), т. е. $H_{\text{ККС}} = 2H_{\text{С}} + H_{\text{И}} = 12,6$ см. Для «HCEIcar 80-0.25» высота сборки составляет $H_{\text{ККС}} = 25$ см, а для «HCEIcsa 160-0.1» – 40,4 см.

Для ККС-1 размеры сектора ABCD (см. рис. 1) равны:

$$r1 = \frac{Wc}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad R1 = r1 + Lc + Dsw,$$

$$\alpha = \frac{360^\circ}{N_{\text{ККС}}} = \frac{2\pi}{N_{\text{ККС}}}.$$

Тогда площадь сектора $S_{\text{ККС}}$ для ККС-1 равна

$$S_1 = \frac{\pi(R1^2 - r1^2)}{N_{\text{ККС}}} =$$

$$= \frac{\pi \left((Lc + Dsw)^2 + Wc(Lc + Dsw) / \operatorname{tg} \frac{\pi}{N_{\text{ККС}}} \right)}{N_{\text{ККС}}}. \quad (4)$$

Для «HCEIcar 80-0.25» и «HCEIcsa160-0.1» размеры сектора ABCD (см. рис. 2) равны

$$r2 = \frac{D_{\text{ККС}}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} - \frac{D_{\text{ККС}}}{2} = \frac{D_{\text{ККС}}}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right),$$

$$R2 = r2 + D_{\text{ККС}}, \quad \alpha = \frac{360^\circ}{N_{\text{ККС}}} = \frac{2\pi}{N_{\text{ККС}}}.$$

Тогда площадь сектора $S_{\text{ККС}}$ для «HCEIcar 80-0.25» и «HCEIcsa160-0.1» равна

$$S_2 = \frac{\pi(R2^2 - r2^2)}{N_{\text{ККС}}} = \frac{\pi D_{\text{ККС}}^2}{N_{\text{ККС}} \sin^2 \frac{\pi}{N_{\text{ККС}}}}. \quad (5)$$

Подставив полученные выражения (4) и (5) в (3), а затем в (2), заменив V_0 на $V_{\text{ККС}}$, получим выражение для удельной выходной мощности как функцию одной переменной $N_{\text{ККС}}$, при условии, что остальные параметры, а именно суммарное напряжение на конденсаторах U_0 , эквивалентная емкость конденсаторов C_0 , индуктивность разрядного контура ККС L_0 , высота ККС $H_{\text{ККС}}$, ширина конденсаторов ККС-1 Wc , длина конденсаторов ККС-1 Lc , наружный диаметр коммутатора ККС-1 D_{sw} , наружный диаметр ККС-2 $D_{\text{ККС}}$, фиксированы и известны для каждой ККС. Для удобства, представим все параметры каждой ККС в табл. 2.

Таблица 2

Параметры ККС, для расчёта удельной мощности

Параметр	40нФ + «FAST LTD»	40 нФ + «L3»	40 нФ + «Kinetech2»	«HCEIcar 80-0.25»	«HCEIcsa 160-0.1»
U_0 , кВ	200	200	200	80	160
C_0 , нФ	20	20	20	250	110
L_0 , нГн	185	155	139	30	62
P_0 , ГВт	3,95	4,3	4,55	5,5	10,2
$H_{\text{ККС}}$, см	15,9	12,6	12,6	25	40,4
Wc , см	15,1	15,1	15,1	–	–
Lc , см	19,1	19,1	19,1	–	–
D_{sw} , см	14	11,7	7,3	–	–
$D_{\text{ККС}}$, см	–	–	–	20,4	18,8

Результаты расчёта удельной выходной мощности p_{\max} для различного количества сборок $N_{\text{ККС}}$ представлены на рис. 4.

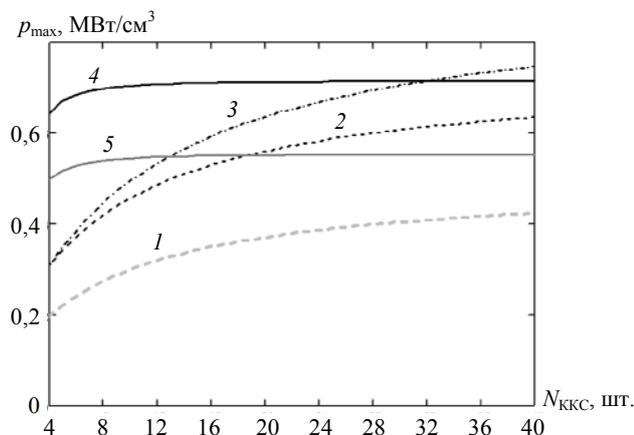


Рис. 4. Зависимость удельной выходной мощности различных ККС от их количества в ЛТД-ступени. 1, 2 и 3 – ККС-1 на базе разрядников «FAST LTD», «L3» и «Kinetech2» соответственно, 4 – ККС «HCEIcsa160-0.1», 5 – ККС «HCEIcar 80-0.25».

Как видно из графиков (рис. 4), практически во всём диапазоне изменения $N_{\text{ККС}}$ удельная выходная мощность «HCEIcsa 160-0.1» (кривая 4) превышает аналогичные показатели остальных ККС. При малом количестве $N_{\text{ККС}}$ удельная мощность «HCEIcsa 160-0.1» более чем в два раза превышает аналогичный показатель ККС на базе разрядника «Kinetech2» (кривая 3). По мере увеличения $N_{\text{ККС}}$ отношение плавно уменьшается, приближаясь к единице при $N_{\text{ККС}} = 32$. Объясняется это тем, что с ростом $N_{\text{ККС}}$ угол α уменьшается, что приводит к более эффективному заполнению площади сектора для ККС-1. Для цилиндрической сборки влияние угла α не так существенно, и эффективность заполнения практически не меняется, начиная с $N_{\text{ККС}} \approx 6$. Заметим также, что даже в случае, когда удельные показатели ККС-1 больше или равны «HCEI csa160-0.1», использование последней может оказаться более предпочтительным из-за почти двукратного превосходства по показателю абсолютной выходной мощности, что соответствует вдвое меньшему количеству ККС в ЛТД-генераторе при той же выходной мощности.

Сборка «HCEIcar 80-0.25», хотя имеет не столь высокие показатели удельной мощности, как у «HCEI csa 160-0.1», но при малом количестве $N_{\text{ККС}}$ (менее 12) превышает удельные показатели ККС-1. Это позволяет рассматривать «HCEIcar 80-0.25» в качестве альтернативы ККС-1 при построении компактных импульсных генераторов, в случае, когда немаловажное значение имеет массогабаритные параметры генератора. В качестве

доказательства служит опыт успешного применения серии компактных сильноточных генераторов для х-пинч нагрузок, построенных из четырёх сборок «HCEIcar 80-0.25» или их раннего аналога «HCEIcar 50-0.25 М» [6, 9, 10].

Заключение

Разработана новая конденсаторно-коммутаторная сборка «HCEIcsa160-0.1», которая имеет проектную выходную мощность $P_{\max} = 10,2$ ГВт, значительно превосходящую аналогичный показатель у других ККС. Благодаря высокой удельной мощности «HCEIcsa160-0.1», её применение в мощных импульсных генераторах видится весьма перспективным и, как показал анализ, позволяет её рассматривать в качестве базового элемента для построения новых компактных ЛТД-ступеней с более высокими удельными показателями. Работы в данном направлении продолжаются, что предполагает экспериментальные исследования и анализ других важных технических и эксплуатационных показателей ККС, а именно: длительность и разброс срабатывания разрядника, вероятность его самопробоя или отказа срабатывания, ресурс и надёжность всей сборки.

Исследование выполнено за счет гранта Российской академии наук (проект № 17-79-20292).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kim A., Frolov S., Alexeenko V., Sinebryukhov V., Mazarakis M., Bayol F. / Proc. of the IEEE Pulsed Power Conference. (Washington, D.C., 2009), p. 565–570.
2. Woodworth J. R., Stygar W. A., Bennett L. F., Mazarakis M. G., Anderson H. D., Harden M. J., Blickem J. R., Gruner F. R., White R. // Phys. Rev. STAB, 2010. Vol. 13. Iss. 8. P. 080401.
3. Жарова Н. В., Ратахин Н. А., Саушкин А. В., Федущак В. Ф., Эрфорт А. А. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 3. С. 96.
4. Ratakhin N. A., Feduschak V. F., Erfort A. A., Saushkin A. A., Zharova N. V., Chaikovskiy S. A., Oreshkin V. I. / Proc. of 14th Int. Conf. on High, Current Electronics (Tomsk, 2006), p. 511–513.
5. Лавринович И. В., Жарова Н. В., Быкова М. Г. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 10/3. С. 253.
6. Feduschak V. F., Zharova N. V., Lavribovich I. V., Oreshkin V. I., Fedunin A. V., Erfort A. A. / Proc. of 15th Int. Conf. on High, Current Electronics (Tomsk, 2008), p. 303–304.
7. Артемов А. П., Жигалин А. С., Лавринович И. В., Орешкин В. И., Ратахин Н. А., Русских А. Г., Федюнин А. В., Чайковский С. А., Эрфорт А. А., Митрофанов К. Н., Грабовский Е. В., Александров В. В., Смирнов В. П. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 4. С. 92.

8. Лавринович И. В., Жарова Н. В., Петин В. К., Ратахин Н. А., Федущак В. Ф., Шляхтун С. В., Эрфорт А. А. // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 3. С. 90.

9. Артёмов Ф. П., Быкова М. Г., Чайковский С. А. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 11/3. С. 26.

10. Чайковский С. А., Артёмов А. П., Жарова Н. В., Жигалин А. С., Лавринович И. В., Орешкин В. И., Ратахин Н. А., Русских А. Г., Федюнин А. В., Федущак В. Ф., Эрфорт А. А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 131.

PACS 84.70.+p

New capacitor-switch assembly for pulsed power generators

I. V. Lavrinovich, D. V. Molchanov, and N. V. Zharova

Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii av., Tomsk, 634055, Russia
E-mail: lavrivan@mail.ru

Received February 16, 2018

A new capacitor-switch assembly «HCEIcsa160-0.1» was designed and investigated. Its electric parameters make possible to obtain a power pulse of 10 GW with a matched load of 0.8 Ohm and with a rise time of 100 ns. The results of the comparative analysis show the prospects of using the "HCEIcsa160-0.1" for constructing the new compact fast LTD stages with high specific parameters.

Keywords: capacitor-switch assembly, high-voltage pulse capacitor, high-current switch, gas switch, fast LTD stage.

REFERENCES

1. A. Kim, S. Frolov, V. Alexeenko, et al., in *Proc. of the IEEE Pulsed Power Conf.* (Washington, D.C., 2009), p. 565–570.
2. J. R. Woodworth, W. A. Stygar, L. F. Bennett, et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **13**, 080401 (2010).
3. N. V. Zharova, N. A. Ratakhin, A. V. Saushkin, et al., *Instr. and Exp. Tech.* **49**, 384 (2006).
4. N. A. Ratakhin, V. F. Feduschak, A. A. Erfort, et al., in *Proc. of 14th Int. Conf. on High Current Electronics* (Tomsk, 2006), p. 511.
5. I. V. Lavrinovich, N. V. Zharova, and M. G. Bykova, *Russian Physics Journal*, No. 10/3, 253 (2012).
6. V. F. Feduschak, N. V. Zharova, I. V. Lavrinovich, et al., in *Proc. of 15th Int. Conf. on High Current Electronics* (Tomsk, 2008), p. 303.
7. A. P. Artyomov, A. S. Zhigalin, I. V. Lavrinovich, et al., *Instr. and Exp. Tech.* **57** (4), 461 (2014).
8. I. V. Lavrinovich, N. V. Zharova, V. K. Petin, et al., *Instr. and Exp. Tech.* **56** (3), 329 (2013).
9. A. P. Artyomov, M. G. Bykova, S. A. Chaikovskiy, et al., *Russian Physics Journal*, No. 11/3, 26 (2012).
10. S. A. Chaikovskiy, A. P. Artyomov, N. V. Zharova et al., *Russian Physics Journal*, No. 8, 131 (2017).