

Разработка импульсного высоковольтного низкоиндуктивного конденсатора и результаты его ресурсных испытаний

Д.В. Рыбка, А.Д. Ленский, С.А. Вагайцев, Е.А. Вагайцев*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**rdm@ovpe.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В работе представлены результаты ресурсных испытаний цилиндрических конденсаторов HCEI_{CSAP}100-0.07 (рабочее напряжение до 100 кВ, емкость 0.07 мкФ) и высоковольтных испытаний прототипа конденсаторно-коммутаторной сборки HCEI_{CSA}200-0.035, собранной на их основе. При разряде конденсатора в режиме, близком к согласованному, на резистивную нагрузку сопротивлением 1.5 Ом выполнено более $5.5 \cdot 10^4$ циклов «заряд-разряд», после чего ресурсные испытания конденсатора прекращены. При испытаниях конденсаторно-коммутаторной сборки в режиме, близком к согласованному, в резистивной нагрузке сопротивлением 1.5 Ом, формируется импульс с фронтом по уровню от нуля до максимума ~ 100 нс. При испытательном напряжении ± 80 кВ амплитуда тока в нагрузке составила ~ 46.5 кА и пиковая мощность импульса ~ 3.3 ГВт.

Ключевые слова: высоковольтный импульсный конденсатор, конденсаторно-коммутаторная сборка, LTD-генератор, LTD-технология.

1. Введение

В ИСЭ СО РАН в отделе высоких плотностей энергии долгое время развивается направление, связанное с разработкой и изготовлением высоковольтных импульсных конденсаторов и конденсаторно-коммутаторных сборок (ККС) [1, 2] способных за малое время около 100 нс отдавать запасенную в них энергию в нагрузку. Собственное производство, организованное в институте, позволяет в широких пределах изменять рабочее напряжение и емкость импульсных конденсаторов и, как следствие, изменять выходные характеристики импульсов напряжения, тока и мощности таких изделий на различных нагрузках. На базе разработанных ККС было успешно реализовано несколько сильноточных импульсных генераторов, предназначенных для импульсного питания х-пинч нагрузок [3, 4].

Проводимые в настоящее время работы по созданию нового поколения сильноточных генераторов на основе LTD-технологии [5–14] используют элементную базу на основе «секций LTD-ступеней», каждая из которых состоит из двух конденсаторов и одного газонаполненного разрядника (рисунок 1) [15].

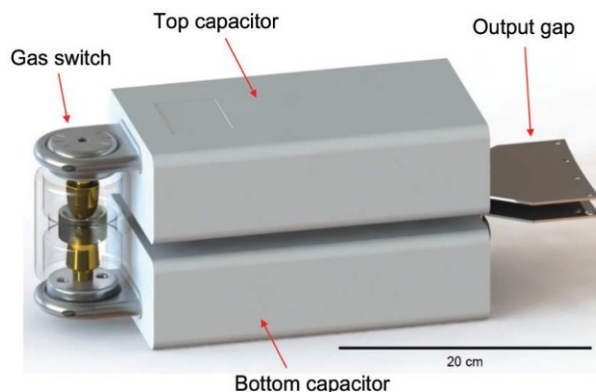


Рис. 1. Внешний вид секции LTD-ступени, используемой в проектах Sandia National Laboratories, США.

Как правило, в классической конструкции LTD-ступени используются аналоги конденсаторов, разработанных компанией General Atomics Electronic Systems, модель

№35426 [10], с номинальной емкостью 40 нФ. Конденсаторы секции заряжаются до напряжения ± 100 кВ разной полярностью. Заявленный изготовителем ресурс составляет $5 \cdot 10^4$ импульсов при пиковой амплитуде тока до 25 кА. Так, например, пиковая мощность импульса в согласованной нагрузке для секции, используемой в LTD-ступени генератора MAIZE, составляет ~ 2.5 ГВт.

Работы по увеличению пиковой электрической мощности секции ведутся по пути уменьшения индуктивности разрядника [16] и конденсаторов [17], и за счет увеличения емкости конденсаторов [17, 18]. В [19] заявлена пиковая мощность секции ~ 3.5 ГВт, а в [15] – на уровне 5 ГВт при разряде на согласованную нагрузку.

Авторы данной работы предлагают в качестве элементной базы для построения LTD-генераторов вместо классических секций использовать конденсаторно-коммутаторные сборки. В данной работе представлена новая модификация цилиндрического высоковольтного конденсатора с зарядным напряжением до 100 кВ, емкостью 70 нФ, предназначенного для использования в ступенях LTD-генераторов и других сильноточных импульсных схемах.

2. Конструкция конденсатора НСЕI_{САP}100-0.07 и ККС НСЕI_{СA}200-0.035

На рисунке 2 представлен эскиз ККС, а на рисунке 3 – предлагаемая компоновка LTD-ступени. Каждая ККС состоит из двух цилиндрических конденсаторов, в центре которых располагается трехэлектродный газовый разрядник.

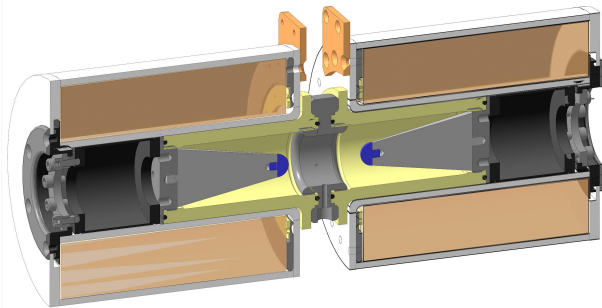


Рис. 2. Эскиз ККС НСЕI_{СA}200-0.035.

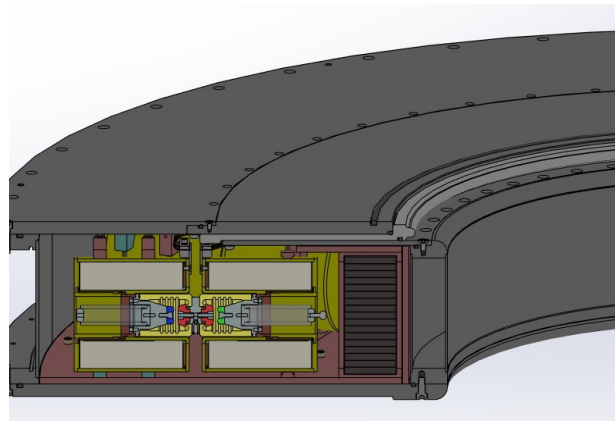


Рис. 3. Продольный разрез LTD-ступени при размещении ККС перпендикулярно оси LTD-ступени.

Используя алгоритм расчета [20], модифицированный под данную компоновку LTD-ступени, были сформулированы требования к электротехническим и габаритным параметрам цилиндрических конденсаторов, используемых в ККС.

Цилиндрический конденсатор НСЕI_{САP}100-0.07 с внешним диаметром 180 мм, внутренним диаметром 70 мм и длиной 200 мм состоит из 517 секций, электрически объединенных по 12 секций последовательно и 43 параллельно. Бумажно-пленочная изоляция секции состоит из четырех слоев бумаги КОН-2 и трех слоев лавсановой пленки общей толщиной 70 мкм. Для распределения поля по поверхности изолятора разрядника первая обмотка (первые внутренние 12 последовательных секций) выполнена фольгой с шириной 50 мм со смещением 10 мм. В секциях второй и третьей обмотки ширина фольги постепенно увеличивается до проектного значения 110 мм (рисунок 4). После пропитки касторовым маслом емкость конденсатора составила $C_1 = 71$ нФ, $\text{tg}\delta = 67 \cdot 10^{-4}$.

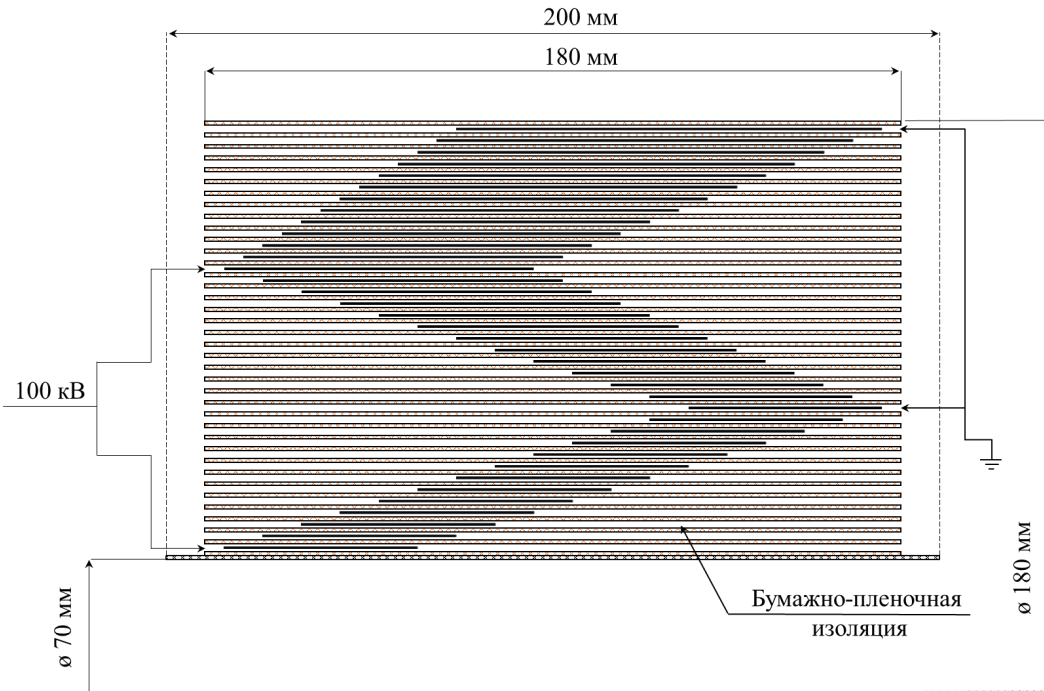


Рис. 4. Схема намотки трех первых обкладок конденсатора НСЕI_{САР}100-0.07 и его общие размеры намотки.

Индуктивность и внутреннее сопротивление конденсатора определялись по осциллограмме тока, полученной с пояса Роговского, при зарядном напряжении 3 кВ при разряде в режиме короткого замыкания по формулам (1) и составили ~50 нГн и 0.2 Ом, соответственно.

$$L = \frac{T^2}{C_1 \left(4\pi^2 + \ln^2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \right)}, \quad (1)$$

$$R = \frac{2L}{T} \ln \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$$

где T – период затухающих колебаний, C_1 – емкость контура, I_1 и I_2 – амплитуды затухающих колебаний, сдвинутых по времени относительно друг друга на величину T .

Фронт импульса тока по уровню от нуля до максимума составил ~100 нс. Согласно оценкам, в режиме разряда на резистивную нагрузку $R_n = (L/C_1)^{1/2} \sim 0.84$ Ом амплитуда импульса тока составит величину ~65 кА при фронте импульса ~75 нс.

3. Результаты испытаний

Ресурсные высоковольтные испытания конденсатора НСЕI_{САР}100-0.07 проводились при зарядном напряжении –100 кВ на автоматизированном испытательном стенде в трансформаторном масле с частотой следования импульсов ~0.1 Гц (рисунок 5). Из-за увеличенной индуктивности разрядного контура согласованный режим разряда реализован при сопротивлении нагрузки 1.5 Ом, изготовленной из 17 резисторов ТВО-10 27 Ом. Для контроля импульса в нагрузку установлен делитель напряжения. Характерный импульс напряжения в нагрузке приведен на рисунке 6. Амплитуда импульса достигает 48 кВ (~32 кА) при фронте импульса от нуля до максимума ~180 нс. Всего было выполнено более 55 тыс. циклов «заряд-разряд», после чего ресурсные испытания конденсатора прекращены.



Рис. 5. Фотография конденсатора HSEI_{CAP}100-0.07, разрядника и резистивной нагрузки после окончания ресурсных испытаний (55 545 импульсов).

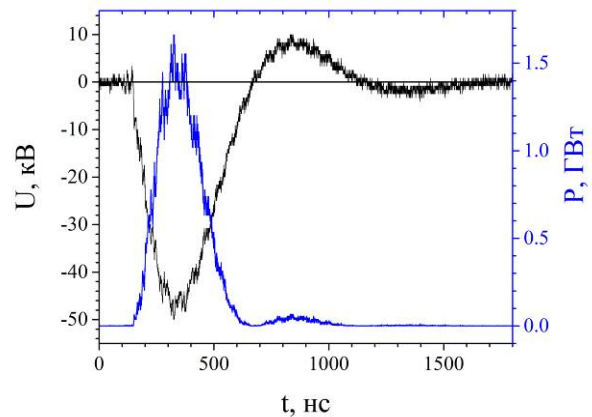


Рис. 6. Характерный импульс напряжения в резистивной нагрузке 1.5 Ом и расчетная кривая электрической мощности при разряде конденсатора HSEI_{CAP}100-0.07. Зарядное напряжение 100 кВ.

На рисунке 7 представлена фотография ККС HSEI_{CSA}200-0.035, высоковольтные испытания которой проводились при зарядном напряжении ± 80 кВ. Всего было произведено ~ 450 циклов «заряд-разряд». Проводились измерения пускового импульса и импульса напряжения в нагрузке, по которым рассчитывались время запуска и джиттер разрядника, оценивались временные и амплитудные параметры импульса в нагрузке. Сопротивление резистивной нагрузки, как и ранее, составляло величину 1.5 Ом. Характерные осциллограммы пускового импульса при срабатывании ККС и импульса напряжения в нагрузке при испытательном зарядном напряжении ± 80 кВ приведены на рисунке 8.

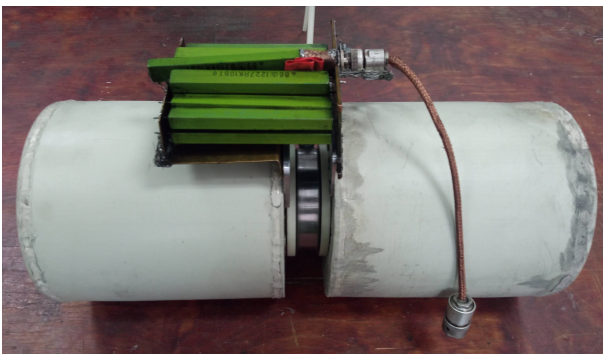


Рис. 7. Фотография ККС HSEI_{CSA}200-0.035 перед установкой в стенд для проведения высоковольтных испытаний.

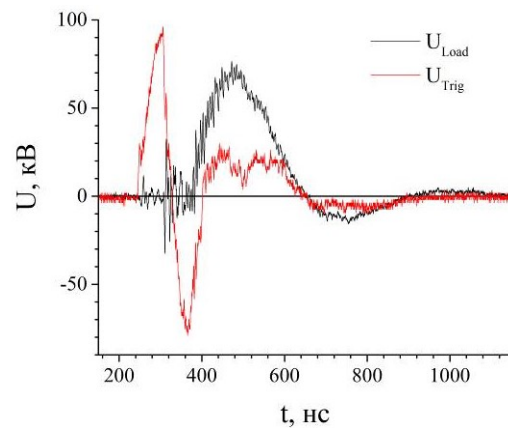


Рис. 8. Характерный импульс напряжения в резистивной нагрузке 1.5 Ом U_{Load} и пусковой импульс U_{Trig} при разряде ККС HSEI_{CSA}200-0.035. Испытательное зарядное напряжение ± 80 кВ.

Фронт импульса напряжения в нагрузке по уровню от нуля до максимума составил ~ 100 нс, амплитуда импульса ~ 70 кВ (46.7 кА). Согласно формулам (1), полная индуктивность контура оценивается в ~ 170 нГн, а активное сопротивление – на уровне ~ 2.1 Ом. Волновое сопротивление контура $\rho = (L/C)^{1/2} \sim 2.15$ Ом. С учетом того, что активное сопротивление каждого конденсатора HSEI_{CAP}100-0.07 составляет ~ 0.2 Ом, а сопротивление нагрузки 1.5 Ом, сопротивление разрядника после коммутации можно оценить в ~ 0.2 Ом.

Тогда, при данном режиме разряда в нагрузке выделяется порядка 70% энергии, 10% теряется в разряднике и еще по 10% остается в конденсаторах ККС.

4. Заключение

В процессе выполнения представленной работы спроектирована конденсаторно-коммутаторная сборка для применения в ступенях LTD-генераторов, изготовлены импульсные низкоиндуктивные цилиндрические конденсаторы с рабочим зарядным напряжением до 100 кВ и проведены их ресурсные испытания. При разряде на резистивную нагрузку 1.5 Ом в режиме, близком к согласованному, количество циклов «заряд-разряд» для конденсатора НСЕI_{САР}100-0.07 составило не менее $5.5 \cdot 10^4$ импульсов при испытательном зарядном напряжении 100 кВ и амплитуде тока в нагрузке ~ 30 кА. Фронт импульса в нагрузке по уровню от нуля до максимума составлял ~ 180 нс.

Проведены высоковольтные испытания конденсаторно-коммутаторной сборки НСЕI_{ССА}200-0.035. Разработанная и изготовленная ККС обеспечивает формирование импульса при разряде на резистивную нагрузку в согласованном режиме с фронтом импульса по уровню от нуля до максимума ~ 100 нс. При зарядном напряжении ± 80 кВ электрическая мощность импульса в нагрузке составляет ~ 3.3 ГВт при амплитуде тока в контуре ~ 46 кА. Увеличение зарядного напряжения до ± 100 кВ позволит увеличить амплитуду тока в нагрузке до 58 кА и пиковую мощность импульса до ~ 5 ГВт.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0001.

5. Список литературы

- [1] N. Zharova, N. Ratakhin, A. Saushkin et al, Fast energy output from a high-current pulsed capacitor by using a pseudospark gap, *Instrum. Exp. Tech.*, **49**, 384, 2006, doi:10.1134/S0020441206030134
- [2] D. Molchanov, I. Lavrinovich, A. Artyomov, et al., New low-inductance capacitor-switch assembly, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1074**, 012110, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1074/1/012110
- [3] I. Lavrinovich, N. Zharova, V. Petin, et al., A compact pulsed X-ray source for high-speed radiography, *Instrum. Exp. Tech.*, **56**, 329, 2013, doi: 10.1134/S0020441213030081
- [4] S. Chaikovsky, A. Artyomov, N. Zharova et al, Small-Size High-Current Generators for X-Ray Backlighting, *Russ. Phys. J.*, **60**, 1408, 2017, doi: 10.1007/s11182-017-1229-x
- [5] W. Stygar, M. Cuneo, D. Headley, et al., Architecture of petawatt-class z-pinch accelerators, *Phys. Rev. STAB*, **10**, 030401, 2007, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.10.030401
- [6] W. Stygar, T. Awe, J. Bailey, et al., Conceptual designs of two petawatt-class pulsed-power accelerators for high-energy-density-physics experiments, *Phys. Rev. STAB*, **18**, 110401, 2015, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.18.110401
- [7] D. Reisman, B. Stoltzfus, W. Stygar et al, Pulsed power accelerator for material physics experiments, *Phys. Rev. STAB*, **18**, 090401, 2015, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.18.090401
- [8] S. Glover, J. Davis, L. Schneider, et al., Impact of time-varying loads on the programmable pulsed power driver called Genesis, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **40** (10), 2588, 2012, doi: 10.1109/TPS.2012.2185070
- [9] R. Spielman, D. Froula, G. Brent, et al., Conceptual design of a 15-TW pulsed-power accelerator for high-energy-density-physics experiments, *Matter and radiation at extremes*, **2**, 204, 2017, doi: 10.1016/j.mre.2017.05.002

- [10] A. Kim, M. Mazarakis, V. Sinebryukhov, et al., Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages, *Phys. Rev. STAB*, **12**, 050402, 2009, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.12.050402
- [11] J. Douglass, B. Hutsel, J. Leckbee, et al., 100 GW linear transformer driver cavity: Design, simulations, and performance, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **21**, 120401, 2018, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.21.120401
- [12] Zhou Lin, Li Zhengong, Wang Zhen, et al., Design of a 5-MA 100-ns linear-transformer-driver accelerator for wire array Z-pinch experiments, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **19**, 030401, 2016, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.19.030401
- [13] Lin Chen, Wenkang Zou, Liangji Zhou, et al., Development of a fusion-oriented pulsed power module, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **22**, 030401, 2019, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.22.030401
- [14] F. Lassalle, A. Luyen, A. Georges, Status on the Sphinx machine based on the 1 – us LTD technology, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **36** (2), 370, 2008, doi: 10.1109/TPS.2008.918659
- [15] R. McBride, W. Stygar, M. Cuneo, et al., A Primer on Pulsed Power and Linear Transformer Drivers for High Energy Density Physics Applications, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **46** (11), 3928, 2018, doi: 10.1109/TPS.2018.2870099
- [16] J. Woodworth, J. Alexander, F. Gruner, et al., Low-inductance gas switches for linear transformer drivers, *Phys. Rev. STAB*, **12**, 060401, 2009, doi:10.1103/PhysRevSTAB.12.060401
- [17] Series PDS/PDSS - Fast Pulse Capacitors [online], June 2024; <https://www.ga.com/capacitors/series-pds-pdss-fast-pulse-capacitors>
- [18] Shanghai Pluspark, HV Pulse Capacitor [online], June 2024; <https://www.shanghaiplusparkelectronics.com/our-products>
- [19] Lin Chen, Wenkang Zou, Jihao Jiang et al, First results from a 760-GW linear transformer driver module for Z-pinch research, *Matter and Radiation at Extremes*, **6**, 045901, 2021, doi:10.1063/5.0003346
- [20] I. Lavrinovich, D. Rybka, A. Lenskiy, et al., Architecture of a 100-ns LTD Generator Based on a New Type of Capacitor-Switch Assemblies, *7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects*, Tomsk, Russia, 2020, doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9241939