

Секция первичного емкостного накопителя энергии с изоляцией воздухом атмосферного давления и зарядным напряжением 40 кВ

А.А. Жерлицын, Е.В. Кумпяк*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**andzh@oit.hcei.tsc.ru*

Создана секция емкостного накопителя энергии с зарядным напряжением 40 кВ, емкостью 110 нФ и характерным временем вывода энергии в нагрузку 125 нс. Секция представляют собой сборку из параллельно включенных конденсаторов и управляемого многозазорного многоканального искрового разрядника, выполненных в едином корпусе. Внешней изоляцией секций и рабочей средой разрядника является сухой воздух атмосферного давления. Секция обеспечивает в резистивной нагрузке 0.9 Ом импульс тока амплитудой 22 кА с фронтом 80 нс по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения. Исследован режим многоканальной коммутации разрядника секции. При зарядном напряжении секции 35–40 кВ и скорости нарастания пускового напряжения 0.5 кВ/нс реализовано одновременное параллельное зажигание в разряднике шести каналов с вероятностью более 50 %. При этом среднеквадратичное отклонение времени задержки срабатывания разрядника относительно импульса пускового напряжения (джиттер) составляет около 7 нс. С увеличением скорости нарастания пускового напряжения до 1.3 кВ/нс джиттер снижается до 2 нс, т.е. реализуется наносекундная точность включения.

Ключевые слова: высоковольтный импульсный генератор, емкостной накопитель энергии, многоканальный искровой разрядник.

1. Введение

Основными технологиями построения генераторов высоковольтных сильноточных субмикросекундных импульсов являются “быстрые” генераторы Аркадьева-Маркса [1] и их более мощная разновидность “impedance-matched Marx” [2, 3], ЛТД генераторы (от английской аббревиатуры LTD – Linear Transformer Driver) [4, 5] и линейные импульсные трансформаторы [6, 7]. Первичные емкостные накопители энергии таких генераторов как правило состоят из параллельно включенных идентичных ветвей, содержащих конденсаторы, которые заряжаются до напряжения в десятки-сотни киловольт и коммутируются своим управляемым разрядником. Ветвь емкостного накопителя со своим разрядником далее именуется «секцией». Характеристики единичной секции являются определяющими для выходных параметров всего емкостного накопителя и генератора в целом.

В настоящее время созданы секции с максимальным зарядным напряжением 100 кВ с временем вывода энергии порядка 100 нс [8–11]. В секциях используются конденсаторы зарубежного производства емкостью 10–100 нФ, предназначенные для режима работы с однократными импульсами. В качестве изоляции секций в емкостных накопителях энергии используется трансформаторное масло [8, 9], воздух [10], элегаз или газовые смеси на его основе [11]. В качестве рабочей среды разрядников секций используется воздух при атмосферном или повышенном давлении.

Отличительной особенностью секции, представленной в данной работе, является использование конденсаторов российского производства, допускающих частотный режим работы. В качестве внешней изоляции секции и рабочей среды разрядников используется осушенный воздух при атмосферном давлении, что позволяет существенно упростить конструкцию и эксплуатацию первичных емкостных накопителей. Кроме того, воздух не требует дополнительных резервуаров для хранения и бесплатный, а также в отличие от других газов или смесей не токсичен.

2. Конструкция секции

Фотография секции показана Рис. 1. В секции используются пять параллельно включенных частотных конденсаторов К75-746, 40 кВ, 0.022 мкФ (ЗАО «Элкод», г. Санкт-Петербург). Конденсаторы залиты в корпус из компаунда на основе эпоксидной смолы и кварцевой пыли. В корпусе выполнена специальная полость, в которую помещается газовый разрядник. Размеры секции – $40 \times 32 \times 9$ см³.



Рис. 1. Секция на основе конденсаторов К75-746, 40кВ, 0.022мкФ.

Используется многозазорный многоканальный управляемый искровой разрядник планарной геометрии, работающий в среде воздуха атмосферного давления. Использование нескольких последовательных зазоров в разряднике расширяет диапазон рабочих напряжений, улучшает быстродействие и стабильность запуска, а зажигание параллельных искровых каналов позволяет снизить индуктивность разрядника и уменьшить потери энергии на коммутацию.

Зазоры в разряднике образованы сферическими электродами диаметром 22 мм, плоским сборным электродом конденсаторов секций и плоским земляным электродом. Сферические электроды расположены в шести рядах, что позволяет зажигать до шести параллельных искровых каналов. Равномерное распределение напряжения по электродам разрядника в стадии зарядки конденсаторов осуществляется делителем из резисторов 68 МОм и шнуров из проводящей резины (погонное сопротивление $\sim 10^7$ Ом/м), размещенных в корпусе разрядника.

В первой конфигурации разрядник имел три зазора длиной 5 мм. Пусковой импульс подавался в каждый из каналов разрядника на электроды первого ряда относительно заземленного электрода. Развязка основного разрядного контура секции и пусковой цепи по постоянному напряжению обеспечивается за счет разделительной емкости между пусковым проводником и пусковыми электродами.

Во второй конфигурации число зазоров в разряднике увеличено до пяти, а длина единичного зазора уменьшена до 3 мм. Суммарный зазор остался прежним и составлял 15 мм. Пусковой импульс подавался в каждый из каналов разрядника на электроды второго ряда относительно заземленного электрода.

3. Схема исследования характеристик секции

Схема исследования секции приведена на Рис. 2. Конденсаторы секции C заряжаются от высоковольтного зарядного источника (1) напряжением положительной полярности. Запуск разрядника секции S осуществляется от генератора пусковых высоковольтных импульсов отрицательной полярности (2). После запуска разрядника конденсаторы разряжаются на резистивную нагрузку R_{load} .

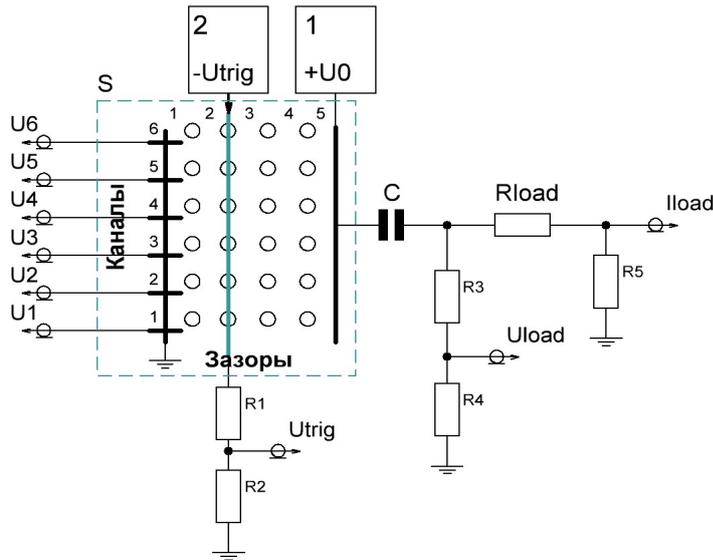


Рис. 2. Схема исследования секции: 1 – высоковольтный зарядный источник, 2 – генератор пусковых импульсов.

Система регистрации включает в себя резистивный делитель R_1-R_2 пускового напряжения $U_{trig}(t)$, резистивный делитель R_3-R_4 напряжения на нагрузке $U_{load}(t)$ и резистивный шунт R_5 для измерения тока разряда $I_{load}(t)$. Исследовались параметры секции в зависимости от сопротивления нагрузки, зарядного напряжения и скорости нарастания пускового импульса. Набиралась статистика времени запаздывания t_d между приходом пускового импульса напряжения и пробоем всех зазоров разрядника секции. Время запаздывания t_d определялось, как время между уровнями 10 % от амплитудного значения пускового импульса напряжения и напряжения на нагрузке. Статистическое время запаздывания характеризуется средним временем запаздывания $\langle t_d \rangle$ в серии импульсов и его среднеквадратичным отклонением σ (джиттер).

Также использовалась оптическая система диагностики на основе фотодиодов для регистрации искровых каналов в зазорах разрядника [12]. Система состоит из шести коллиматоров с протяженным отверстием, свет из которых по оптоволокну подается на фотодиоды со схемой предварительного усиления HFBR-25X6Z (Avago Technologies). Размеры и расположение коллиматоров настроены так, чтобы исключить попадание света с соседних каналов, т.е. через коллиматор проходит свет только из канала, над которым он размещен. Временное разрешение фотодиодов и схемы усиления составляет единицы наносекунд. Шесть сигналов U_1-U_6 с каждого из фотодиодов после усиления регистрируются цифровыми осциллографами с полосой 500 МГц. Набиралась статистика числа зажигаемых искровых каналов в разряднике. Порядок сбора статистики числа зажигаемых каналов приведен в работе [12].

4. Параметры секции

Параметры выходных импульсов при работе секции на резистивную нагрузку R_{load} обобщены в таблице 1. Для секции реализуется «согласованный» режим разряда, т.е. режим с максимальной мощностью вывода энергии из емкостного накопителя энергии, при сопротивлении нагрузки $R_{load} \sim 0.9$ Ом. Осциллограммы тока и напряжения для этого режима показаны на Рис. 3. В режиме разряда секции на резистивную нагрузку около 0.9 Ом реализуется импульс тока амплитудой 22 кА с фронтом 80 нс по уровню (0.1–0.9) от

амплитудного значения. Секция обеспечивает вывод энергии в нагрузку за время ~ 175 нс с пиковой мощностью ~ 0.5 ГВт.

Таблица 1. Параметры импульсов секции: U_0 – зарядное напряжение секции; I_m – амплитуда тока разряда; t_f – фронт импульса тока по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения; W – пиковая мощность вывода энергии в нагрузку; t_E – время вывода в нагрузку энергии по уровню (0.1–0.9) от максимальной.

	R_{load} , Ом	U_0 , кВ	I_m , кА	Реверс, %	t_f (0.1-0.9), нс	W , МВт	t_E (0.1-0.9), нс
1	0.11	20	17	74	121	31	184
2	0.61	40	27	26	84	434	166
3	0.94	40	22	11	81	471	175
4	1.67	40	17	0	70	462	230

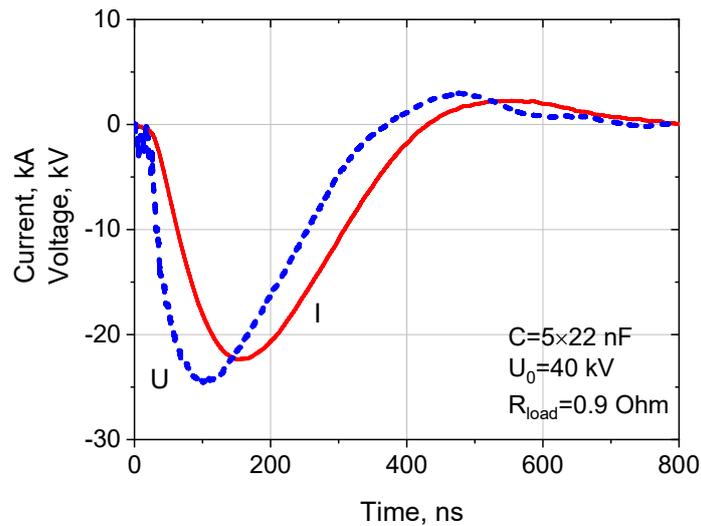


Рис. 3. Напряжение (пунктирная линия) и ток разряда секции (сплошная линия) в «согласованном» режиме при зарядном напряжении $U_0=40$ кВ.

Джиттер секции зависит от зарядного напряжения, амплитуды и/или скорости нарастания пускового напряжения. Очевидно, что чем выше амплитуда и скорость нарастания пускового напряжения, тем лучше. Однако растут требования к изоляции и усложняется техническая реализация пусковой системы, особенно для многосекционных емкостных накопителей энергии. Экспериментальные данные показывают, что при зарядном напряжении 35–40 кВ джиттер на уровне 5–10 нс способен обеспечить импульс пускового напряжения со средней скоростью нарастания около 0.5 кВ/нс. С увеличением скорости нарастания пускового напряжения до 1.3 кВ/нс джиттер снижается до 2 нс, т.е. реализуется наносекундная точность включения.

Исследован режим многоканальной коммутации разрядника секции при средней скорости нарастания пускового напряжения около 0.5 кВ/нс. Набрана статистика числа каналов, позволившая рассчитать вероятность зажигания искровых каналов для каждого из зазоров в двух конфигурациях разрядника (Рис. 4). Получено, что во второй конфигурации реализуется одновременное зажигание всех шести каналов с вероятностью более 50 %. В то время как для первой конфигурации с вероятностью более 50 % одновременно зажигаются лишь три канала.

Апробирована работа секции при частоте следования импульсов 1 и 5 Гц (Рис. 5). Продемонстрирована стабильная работа секции на частоте в единицы Гц. Стандартное отклонение времени задержки срабатывания разрядника секции относительно импульса пускового напряжения σ в серии из 10^4 импульсов составил около 7 нс при средней скорости нарастания импульса пускового напряжения ~ 0.5 кВ/нс.

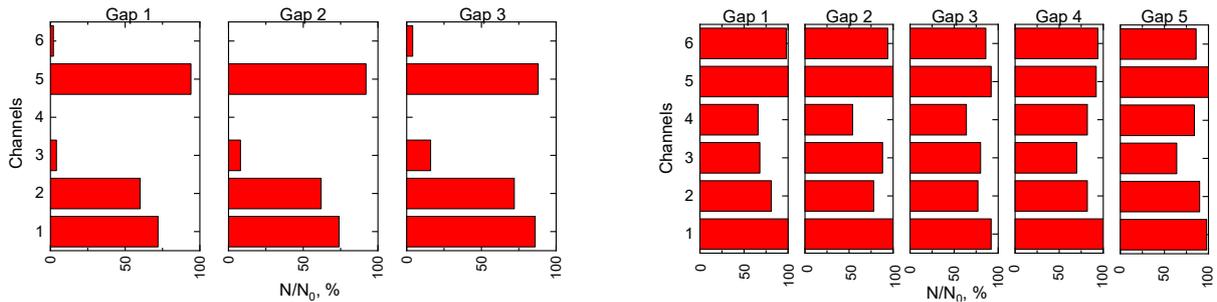


Рис. 4. Вероятность зажигания искровых каналов в разряднике с тремя зазорами длиной 5 мм (слева) и в разряднике с пятью зазорами длиной 3 мм (справа). Зарядное напряжение 40 кВ. Скорость нарастания пускового напряжения 0.5 кВ/нс.

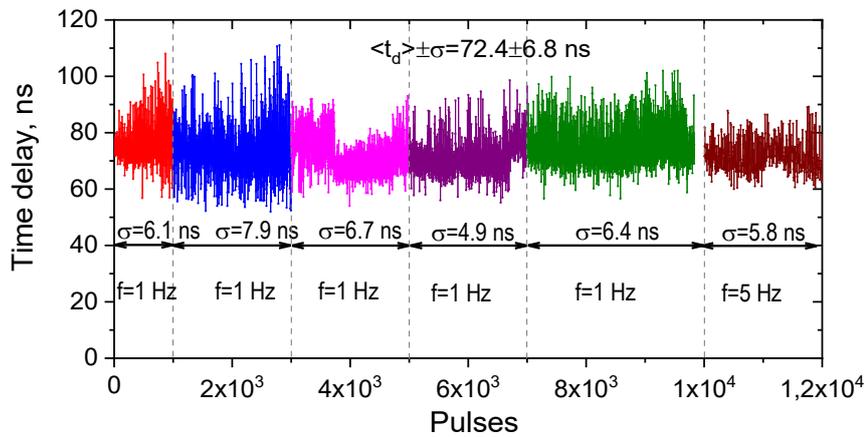


Рис. 5. Время задержки t_d импульса напряжения на нагрузке относительно импульса пускового напряжения при работе на частоте 1 и 5 Гц. Зарядное напряжение секции 40 кВ.

5. Заключение

Создана секция для первичного емкостного накопителя энергии с изоляцией воздухом атмосферного давления. Секция представляет собой сборку из параллельно включенных конденсаторов и управляемого многозазорного многоканального искрового разрядника, выполненных в едином корпусе. Внешней изоляцией секции и рабочей средой разрядника является сухой воздух атмосферного давления. Суммарная емкость конденсаторов секции составляет 110 нФ. В режиме разряда секции на резистивную нагрузку около 0.9 Ом реализуется импульс тока амплитудой 22 кА с фронтом 80 нс по уровню (0.1–0.9) от амплитудного значения. Характерное время вывод энергии в нагрузку составляет 175 нс.

В разряднике секции реализуется одновременное зажигание шести параллельных искровых каналов с вероятностью более 50 % и джиттером около 7 нс при средней скорости нарастания пускового напряжения 0.5 кВ/нс. Продемонстрирована успешная работа секции при частоте следования импульсов 1–5 Гц.

Благодарности

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

6. Список литературы

- [1] S.K. Lam, A.R. Miller, L.L. Sanders, P. Sincerny, and T. Tucker, Fast discharge energy storage development for advanced X-ray simulators, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **33**(2), 982, 2005, doi: 10.1109/TPS.2005.845089

- [2] W.A. Stygar, et al., Impedance-matched Marx generators, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **20**, 040402, 2017, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.040402
- [3] B. Guegan, F. Bayol, D. Arnal, and P. Mouly, Mega-volt impedance-matched Marx, *23th IEEE Intern. Pulsed Power Conf.*, USA, Dec. 2021, doi: 10.1109/PPC40517.2021.9733131
- [4] A.N. Bostrikov et al., Primary energy storages based on linear transformer stages, *Laser and Particle Beams*, **21**(2), 295, 2003, doi: 10.1017/S0263034603212209
- [5] A.A. Kim, and M.G. Mazarakis, The story of the LTD development, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **48**(4), 749, 2020, doi: 10.1109/TPS.2019.2954210
- [6] A.V. Luchinskii, N.A. Ratakhin, V.F. Fedushak, and A.N. Shepelev, Powerful pulsed electrophysical transformers from the Institute of High-current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, *Russian Physics Journal*, **38**(12), 1246, 1995, doi: 10.1007/BF00559385
- [7] A.A. Zherlitsyn, V.M. Alexeenko, and S.S. Kondratiev, An air insulated linear pulse transformer for electrodischarge technology, *Journal of Instrumentation*, **16**, P12006, 2021, doi: 10.1088/1748-0221/16/12/P12006
- [8] A.A. Kim, et al., Development and tests of fast 1-MA linear transformer driver stages, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **12**, 050402, 2009, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.12.050402
- [9] A.A. Kim et al., Super fast 75 ns LTD stage, *16th IEEE Intern. Pulsed Power Conf.*, Albuquerque, USA, 148, 2007, doi: 10.1109/PPPS.2007.4345507
- [10] A.A. Zherlitsyn, B.M. Kovalchuk, and G.V. Smorudov, Capacitor units with air insulation for linear transformers, *Instruments and Experimental Techniques*, **52**(6), 802, 2009, doi: 10.1134/S0020441209060098
- [11] Xiaofeng Jiang, et al., A gas-insulated mega-ampere-class linear transformer driver with pluggable bricks, *Rev. Sci. Instrum.*, **91**, 123303, 2020, doi: 10.1063/5.0028451
- [12] A.A. Zherlitsyn, and E.V. Kumpyak, Multichannel switching in a multigap gas switch at atmospheric pressure, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **23**, 100402, 2020, doi: 10.1103/PhysRevSTAB.23.100402