

Сильноточный коммутатор для малоиндуктивной конденсаторно-коммутаторной сборки*И. В. Лавринович, Д. В. Молчанов, А. П. Артёмов, Д. В. Рыбка*

Разработан сильноточный газовый разрядник для применения в составе малоиндуктивной конденсаторно-коммутаторной сборки. Представлены зависимости задержки и разброса срабатывания разрядника от давления рабочего газа (сухого воздуха) при различном уровне рабочего напряжения. Исследования показали, что при давлении рабочего газа 8,6 атм., зарядном напряжении ± 80 кВ и импульсе запуска положительной полярности с амплитудой 80 кВ среднее значение задержки срабатывания разрядника составляет 11,2 нс, а разброс времени срабатывания составляет $\pm 1,3$ нс.

Ключевые слова: конденсаторно-коммутаторная сборка, сильноточный коммутатор, газовый разрядник, задержка срабатывания, разброс срабатывания.

Введение

В последнее время в области мощной импульсной техники активно развивается подход к построению мощных импульсных генераторов тераваттного уровня на основе «быстрых» емкостных накопителей. Принцип действия таких генераторов заключается в генерации с помощью первичного емкостного накопителя электрического импульса необходимой формы и длительности, причем не требующих дополнительного сжатия по времени. Такой подход позволяет передавать электрическую энергию непосредственно в нагрузку, отказавшись от использования промежуточных накопителей, что существенно упрощает конструкцию и эксплуатацию установки, а также снижает её габаритные размеры и стоимость.

Для целого ряда исследований, например, для сжатия твердотельных и газовых лайнеров [1–3], для генерации пучков заряженных частиц и нейтронов [4], а также для генерации импульсного рентгеновского излучения наносекундной длительности различного спектра [5, 6], наибольший практический интерес представляют мощные

ускорители, способные обеспечить на нагрузке электрический импульс со временем нарастания 100 нс и меньше. Подобное требование предъявляется и к входящим в их состав быстрым емкостным накопителям. Такое условие накладывает определённые ограничения на электрические параметры разрядного контура емкостного накопителя, который (помимо самого емкостного накопителя – конденсатора) содержит также коммутатор, токоведущие шины и нагрузку.

Коммутатор в такой конденсаторно-коммутаторной сборке (ККС) является наиболее важным элементом, так как его габаритные размеры влияют на конфигурацию и, как следствие, на индуктивность всего разрядного контура, а его коммутационные свойства определяют параметры применяемых конденсаторов и влияют на ресурс и надёжность работы всей системы.

Как показала практика, наилучшим образом для построения конденсаторно-коммутаторныхборок подходят искровые газовые разрядники повышенного давления, которые при сравнительно небольших габаритных размерах способны удерживать постоянное зарядное напряжение до сотен киловольт и коммутировать с наносекундным разбросом токи амплитудой до нескольких десятков килоампер. Например, газовые разрядники разнообразного типа и конструкции [7], разработанные для быстрых ЛТД-ступеней различными научными группами из России и США, были испытаны при работе ККС [8, 9], состоящей из разрядника и двух конденсаторов прямоугольной/параллелепipedной формы. В такой ККС разрядник располагается в стороне от коммутируемых с его помощью конденсаторов, а индук-

Лавринович Иван Валериевич, н.с., к.т.н.
Молчанов Денис Викторович, инженер-исследователь,
аспирант.
Артёмов Антон Петрович, м.н.с.
Рыбка Дмитрий Владимирович, н.с., к.ф.-м.н.
Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634055, Томск, пр-т Академический, 2/3.
Тел. (3822) 49-23-35. E-mail: lavrivan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2018 г.

© Лавринович И. В., Молчанов Д. В., Артёмов А. П.,
Рыбка Д. В., 2018

тивность разрядного контура ККС для всех испытанных вариантов газовых разрядников составляет не менее 139 нГн и, видимо, близка к предельному значению для данной конфигурации. Очевидно, что индуктивность разрядного контура физически (теоретически) ограничивает максимальную выходную мощность P_{\max} сборки, которая для простейшей LC-цепочки, включенной на согласованное сопротивление $R = 1,1(L/C)^{0,5}$, может быть найдена по формуле:

$$P_{\max} = 0,25U^2 t_{\max}/L, \quad (1)$$

где U – суммарное зарядное напряжение конденсаторов, t_{\max} – время нарастания импульса мощности до максимума, которое согласно принятым условиям равно 100 нс, а L – суммарная индуктивность разрядного контура ККС.

С целью снизить индуктивность разрядного контура ККС и повысить её выходную мощность нами была предложена принципиально новая конструкция ККС [10], которая состоит из двух импульсных конденсаторов цилиндрической формы, соединённых общим разрядником, расположенным частично внутри каждого из них. Как показали проведённые ранее экспериментальные исследования [10], индуктивность такой ККС составляет всего 62 нГн, что, как ожидается, при эквивалентной ёмкости 110 нФ и зарядном напряжении ± 80 кВ позволит обеспечить на согласованной нагрузке 0,8 Ом импульс мощности на уровне 10 ГВт с временем нарастания 100 нс.

Целью настоящей работы было исследование рабочих характеристик газового разрядника, разработанного для данной ККС, в интересах получения зависимости напряжения самопробоя от давления рабочего газа в разряднике, а также зависимостей запаздывания и разброса срабатывания разрядника от зарядного напряжения и давления рабочего газа.

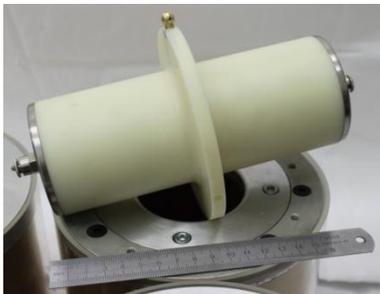


Рис. 1. Фото сильноточного газового разрядника.

Испытательный стенд

Общий вид разработанного газового разрядника представлен на рис. 1. Исследование запаздывания и разброса данного разрядника проводились на стенде, принципиальная электрическая схема которого представлена на рис. 2. От высоковольтных источников питания «ВИ +80 кВ» и «ВИ –80 кВ» через зарядные резисторы R_1 происходила зарядка двух батарей высоковольтных керамических конденсаторов C_1 ёмкостью 430 пФ (каждая батарея состояла из трёх параллельных ветвей, содержащих по семь конденсаторов КВИ-3 12 кВ ёмкостью 1000 пФ, соединённых последовательно) до одинакового напряжения U_1 , но противоположной полярности. Уровень зарядного напряжения каждой батареи конденсаторов контролировался с помощью двух киловольтметров: положительное напряжение – электростатическим киловольтметром С100, отрицательное – спектральным цифровым киловольтметром КВЦ-120. От высоковольтного источника «ВИ -80 кВ» через резистор R_2 , жилу радиочастотного кабеля К марки РК-75-7 и резистор R_3 также заряжалась конденсаторная батарея C_0 ёмкостью 3,3 нФ, которая вместе с двухэлектродным газовым разрядником P_0 располагалась в отдельном металлическом корпусе, заполненном трансформаторным маслом и образовывала блок запуска основного разрядника P_1 . Управляющий электрод разрядника P_1 подключался через резистор R_3 к заземлённым обкладкам конденсаторов C_1 , поэтому на стадии зарядки конденсаторов C_1 и C_0 управляющий электрод имел нулевой потенциал. При срабатывании разрядника P_0 , пробой которого инициировался сбросом давления сжатого в нём воздуха, по кабелю K , длина которого составляет 8 метров, передавался импульс запуска положительной полярности и амплитудой, близкой зарядному напряжению U_1 . При приходе через ~ 40 нс импульса запуска на управляющий электрод основного разрядника происходил последовательный пробой сначала между управляющим и «отрицательным» электродом, а затем между управляющим и «положительным» электродом. В результате срабатывания разрядника P_1 происходило замыкание цепи разряда конденсаторов C_1 и по ней через коммутатор протекал ток разряда I_1 . Производная тока I_0 импульса запуска и производная тока основного разряда I_1 измерялись магнитными зондами МЗ₀ и МЗ₁ соответственно.

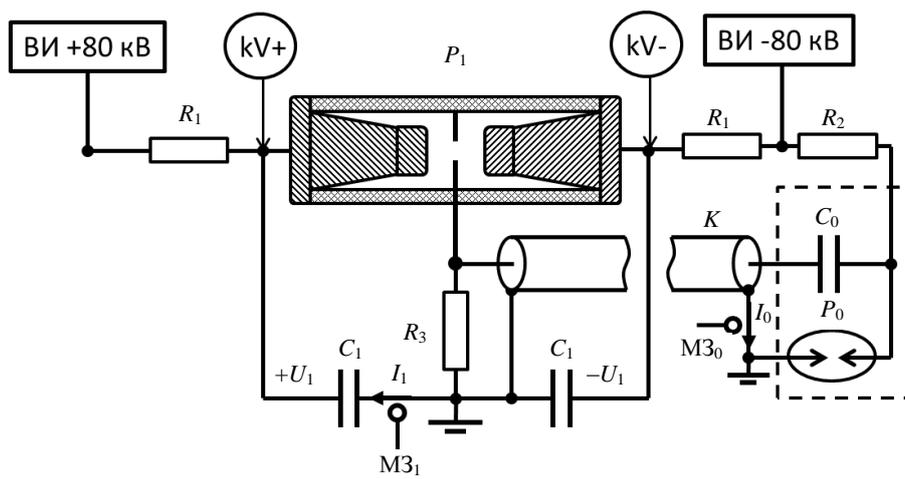


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема стенда испытаний газового разрядника.

Методика эксперимента и результаты

Эксперименты по измерению напряжения самопробоя от давления рабочего газа в разряднике проводились на испытательном стенде (рис. 2), электрическая схема которого была немного изменена. Подача высокого напряжения от высоковольтного источника питания происходила только на одном из конденсаторов C_1 , и, соответственно, на одном из электродов разрядника. При этом управляющий и противоположный основной электроды были заземлены, а блок запуска в схеме отсутствовал. Сначала в разряднике устанавливалось необходимое давление сухого воздуха (точка росы

$-50\text{ }^\circ\text{C}$), затем плавно поднималось напряжение на конденсаторе C_1 до момента пробоя межэлектродного промежутка. Напряжение пробоя фиксировалось. После пробоя разрядник продувался. Эксперимент проводился пять раз при одинаковом давлении, затем давление увеличивалось на $0,5\text{ атм.}$, и эксперимент повторялся.

Полученная зависимость напряжения самопробоя для положительной и отрицательной полярности от давления сухого воздуха в разряднике приведена на рис. 3. Разброс напряжения самопробоя, полученный для данного режима работы разрядника, находился в пределах $1\text{--}2\%$ от среднего значения.

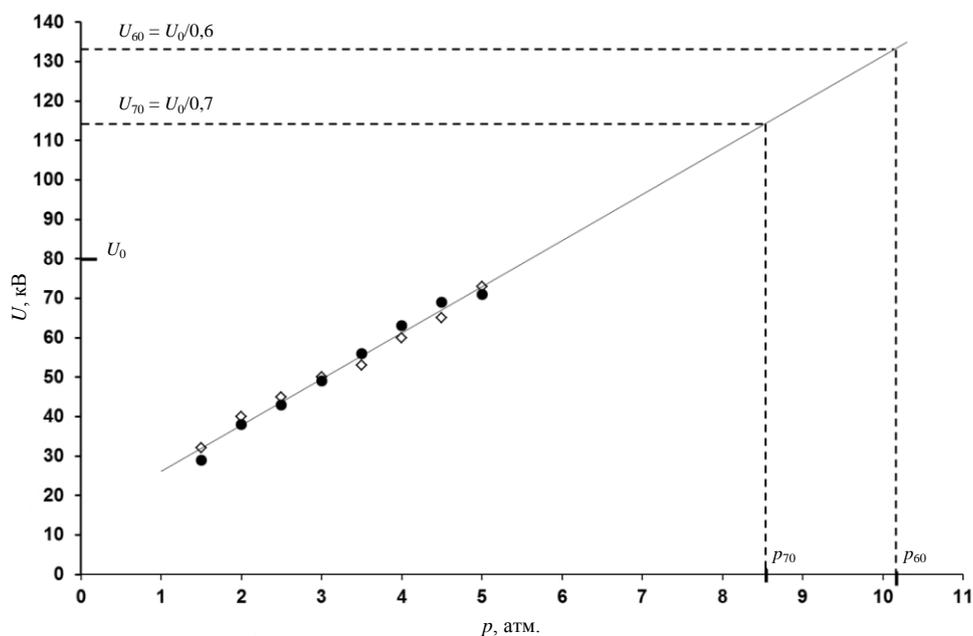


Рис. 3. Зависимость напряжения самопробоя положительной (ромбики) и отрицательной (кружки) полярностей от давления сухого воздуха в разряднике. Горизонтальными пунктирными линиями обозначены уровни напряжения самопробоя U_{60} и U_{70} , по отношению к которым рабочее зарядное напряжение $U_0 = 80\text{ кВ}$ составляет 60% и 70% от них соответственно. Вертикальными пунктирными линиями, отмечены значения давления сухого воздуха в разряднике $p_{60} = 10,2\text{ атм.}$ и $p_{70} = 8,6\text{ атм.}$, которым соответствуют напряжения U_{60} и U_{70} на прямой «самопробоя» при зарядном напряжении $U_0 = 80\text{ кВ}$.

Так как используемые высоковольтные источники питания ограничены по напряжению уровнем 80 кВ, то была произведена линейная экс-

позированного напряжения и давления.

Прямая, полученная экстраполированием, позволяет определить для каждого уровня зарядного напряжения U_0 давление p_x , соответствующее напряжению самопробоя $U_x = 100U_0/x$, где x – процентное соотношение между U_0 и U_x .

Измерения времени запаздывания и разброса срабатывания разрядника проводились на испытательном стенде при различном уровне зарядного напряжения U_0 , которое варьировалось в диапазоне 40–80 кВ с шагом 5 кВ. При этом для каждого значения U_0 измерения проводились при трёх различных давлениях сухого воздуха в разряднике p_{60} , p_{70} и p_{80} , значение которых определялись с помощью прямой самопробоя (рис. 3). В качестве примера на рис. 3 показано, как опре-

делялись p_{60} и p_{70} для зарядного напряжения $U_0 = 80$ кВ.

Величина задержки срабатывания τ разрядника определялась из серий в 20 выстрелов, проведенных для каждого зарядного напряжения и давления. Разброс срабатывания σ определялся как величина стандартного отклонения для всех двадцати значений. Полученные значения задержки и разброса срабатывания разрядника в зависимости от величины зарядного напряжения и давления сухого воздуха в разряднике представлены на рис. 4.

Поскольку разрядник был разработан для ККС с номинальным рабочим напряжением ± 80 кВ, то при этом значении зарядного напряжения и при давлениях p_{60} , p_{70} и p_{80} были проведены уточняющие эксперименты, включающие в себя измерения задержки и разброса срабатывания в сериях из 100 выстрелов для каждой величины давления. Полученные результаты представлены в таблице.

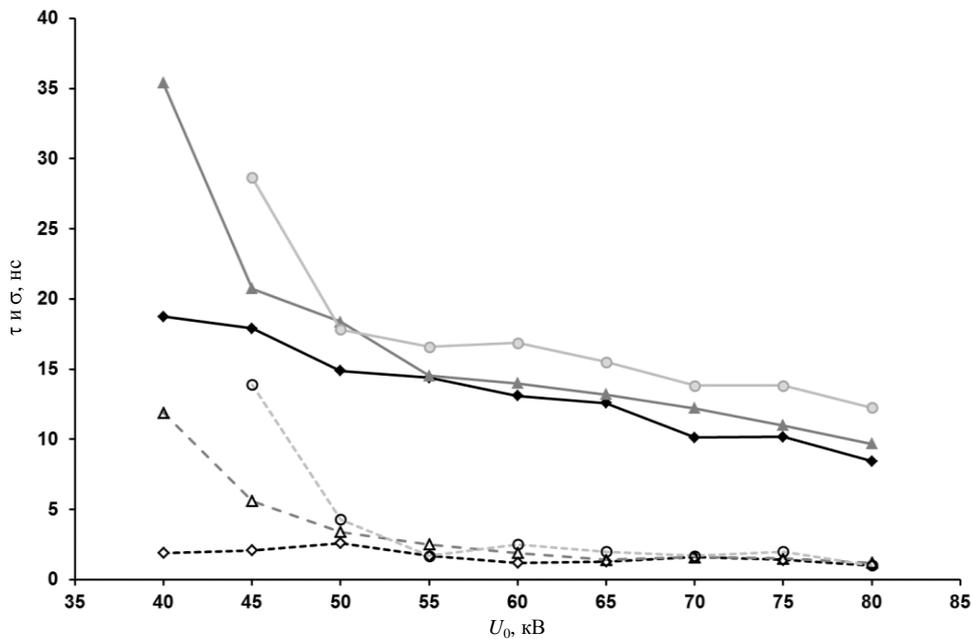


Рис. 4. Задержка τ (сплошные линии) и разброс σ (пунктирные линии) срабатывания разрядника при различном уровне зарядного напряжения и давления в разряднике равном p_{60} (кружки), p_{70} (треугольники) и p_{80} (ромбики).

Таблица

Задержка и разброс срабатывания разрядника при зарядном напряжении ± 80 кВ и различных давлениях сухого воздуха

Давление	$p_{80} = 7,4$ атм.	$p_{70} = 8,6$ атм.	$p_{60} = 10,2$ атм.
$\tau \pm \sigma$, нс	$9,7 \pm 1,2$	$11,2 \pm 1,3$	$13,5 \pm 1,5$

Заключение

В работе разработан новый сильноточный газовый разрядник для малоиндуктивной конденсаторно-коммутаторной сборки с уровнем выходной

импульсной мощности 10 ГВт. Получена зависимость напряжения самопробоя от давления рабочего газа в разряднике. Получены зависимости задержки и разброса срабатывания разрядника от уровня зарядного напряжения и давления газа в нём.

Проведённые исследования показали, что при номинальном зарядном напряжении 80 кВ и давлении сухого воздуха в разряднике равном 8,6 атм. разброс срабатывания составляет 1,3 нс. Полученная величина разброса сравнима с аналогичным показателем других разрядников [8, 9], применяемых в схемах с параллельной работой большого количества ККС [7, 11, 12], что позволяет надеяться на успешное применение разработанного разрядника в подобных системах.

В рамках выполняемого проекта, планируются дальнейшие исследования коммутационных характеристик разработанного разрядника, но при уровне коммутируемого тока около 100 кА, то есть близком к номинальному. Также планируются ресурсные испытания нескольких опытных образцов разработанного разрядника при работе в составе ККС.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 17-79-20292).

ЛИТЕРАТУРА

1. Awe T. J., Peterson K. J., Yu E. P., McBride R. D., Sinars D. B., Gomez M. R., Jennings C. A., Martin M. R., Rosenthal S. E., Sefkow A. B., Slutz S. A., Vesey R. A., Schroen D. G., Tomlinson K. // Physical Review Letters. 2016. Vol. 116(6). P. 065001.
2. Oreshkin V. I., Chaikovskiy S. A., Datsko I. M., Labetskaya N. A., Mesyats G. A., Oreshkin E. V., Ratakhin N. A., Rybka D. V. // Physics of Plasmas. 2016. Vol. 12(23). P. 122107.
3. Bakshyt R. B., Oreshkin V. I., Rousskikh A. G., Zhigalin A. S. // Plasma physics and controlled fusion. 2018. Vol. 60(3). P. 035015.
4. Петин В. К., Шляхтун С. В., Орешкин В. И., Ратахин Н. А. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 6. С. 103.
5. Месяц Г. А., Шелковенко Т. А., Иваненков Г. В. и др. // ЖЭТФ. 2010. Т. 138. Вып. 3(9). С. 411.
6. 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 Вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 131.
7. 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.
8. Woodworth J. R., Alexander J. A., Gruner F. R., Stygar W. A., Harden M. J., Blickem J. R., Dension G. J., White F. E., Lucero L. M., Anderson H. D., Bennett L. F., Glover S. F., Van DeValde D., Mazarakis M. G. // Phys. Rev. STAB. 2009. Vol. 12. Iss. 6. P. 060401.
9. 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.
10. Лавринович И. В., Молчанов Д. В., Жарова Н. В. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 97.
11. Kim A. A., Mazarakis M. G., Sinebryukhov V. A., Kovalchuk B. M., Visir V. A., Volkov S. N., Bayol F., Batrikov A. N., Durakov V. G., Frolov S. V., Alexeenko V. M., McDaniel D. H., Fowler W. E., LeChien K., Olson C., Stygar W. A., Struve K. W., Porter J., Gilgenbach R. M. // Phys. Rev. STAB. 2009. Vol. 12. Iss. 5. P. 050402.
12. Woodworth J. R., Fowler W. E., Stoltzfus B. S., Stygar W. A., Sceiford M. E., Mazarakis M. G., Anderson H. D., Harden M. J., Blickem J. R., White R., Kim A. A. // Phys. Rev. STAB. 2011. Vol. 14. Iss. 4. P. 040401.

PACS: 84.70.+p

High-current switch for a low-inductance capacitor-switch assembly

I. V. Lavrinovich, D. V. Molchanov, A. P. Artyomov, and D. V. Rybka

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

Received April 11, 2018

A high-current gas switch was developed for use in the low-inductance capacitor-switch assembly. Dependences of the delay and the jitter of the switch, on the pressure of the working gas – dry air, at different operating voltage levels are presented. Studies have shown that with an operating gas pressure of 8.6 atm, a charging voltage of ± 80 kV and a positive-polarity triggering pulse with an amplitude of 80 kV, the average delay of the switch is 11.2 ns, and the jitter is ± 1.3 ns.

Keywords: capacitor-switch assembly, high-current switch, gas switch, switch delay, jitter.

REFERENCES

1. T. J. Awe, K. J. Peterson, E. P. Yu, et al., *Physical Review Letters* **116**, 065001 (2016).
2. V. I. Oreshkin, S. A. Chaikovsky, I. M. Datsko et al., *Physics of Plasmas* **12**, 122107 (2016).
3. R. B. Baksht, V. I. Oreshkin, A. G. Rousskikh, et al., *Plasma physics and controlled fusion* **60**, 035015 (2018).
4. V. K. Petin, S. V. Shlyakhtun, V. I. Oreshkin, et al., *Technical Physics* **53**, 776 (2008).
5. G. A. Mesyats, T. A. Shelkovenko, G. V. Ivanenkov, et al., *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **111**, 363 (2010).
6. S. A. Chaykovskiy, A. P. Artomov, N. V. Zharova, et al., *Russian Physics Journal* **60**, 1408 (2017).
7. A. Kim, S. Frolov, V. Alexeenko et al., in *Proc. of the IEEE Pulsed Power Conf.*, (2009). pp. 565–570
8. J. R. Woodworth, J. A. Alexander, F. R. Gruner, et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12**, 060401 (2009).
9. J. R. Woodworth, W. A. Stygar, L. F. Bennett, et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **13**, 080401 (2010).
10. I. V. Lavrinovich, D. V. Molchanov, A. P. Artyomov, et al., *Prikl. Phys.*, No. 2, 97 (2018).
11. A. A. Kim, M. G. Mazarakis, V. A. Sinebryukhov, et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12**, 050402 (2009).
12. J. R. Woodworth, W. E. Fowler, B. S. Stoltzfus, et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14**, 040401 (2011).