# \_\_\_\_ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ \_\_\_ ТЕХНИКА

УДК 621.31+533.9.07

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОЙ ГАЗОВОЙ ИНЖЕКЦИИ НА ГАШЕНИЕ МОЩНОЙ ДУГИ

© 2022 г. А. В. Будина, А. А. Богомаза, М. Э. Пинчука,\*

<sup>а</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН Россия, 191186, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18

\*e-mail: pinchme@mail.ru

Поступила в редакцию 05.11.2021 г.

После доработки 26.11.2021 г.

Принята к публикации 28.11.2021 г.

Представлено описание экспериментального стенда для исследования воздействия синхронной газовой инжекции на гашение мощной дуги, приведены некоторые полученные на нем результаты. В состав стенда входят электроразрядная экспериментальная установка, позволяющая моделировать процесс впрыска холодного газа высокого давления в область горения дуги в заданный момент времени, конденсаторная батарея емкостью  $38~\mathrm{M}\Phi$ , а также различные системы измерений и диагностики. Эксперименты проводились с дугами с амплитудой тока  $3-25~\mathrm{k}A$  при длительности полупериода тока  $10~\mathrm{mc}$  и зарядном напряжении батареи  $0.8-4.5~\mathrm{k}B$ .

## **DOI:** 10.31857/S0032816222020112

## 1. ВВЕДЕНИЕ

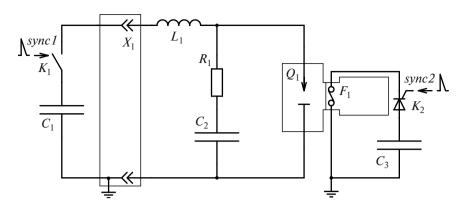
Увеличивающаяся сложность энергетических систем при одновременном повышении требований к их безопасности и экологичности требует непрерывного развития конструкций и принципов построения отключающих защитных устройств [1, 2]. Компонентами, обеспечивающими защиту линий передачи электрической энергии от грозовых и коммутационных перенапряжений, являются системы грозозащитных тросов, газовые разрядники и нелинейные ограничители перенапряжения [3—5].

В настоящее время производятся и широко используются коммерческие защитные устройства мультикамерные разрядники, работа которых основана на пробое серии последовательных газовых зазоров между электродами в открытых в атмосферу разрядных камерах [5, 6]. Такие разрядники при прохождении сильного тока испытывают критический уровень нагрузок с большим износом элементов конструкции [7-11]. Для уменьшения износа и повышения отключающей способности простую конструкцию разрядников различным образом модифицируют [5, 6, 10, 12, 13] для минимизации времени горения дуги и предотвращения повторного пробоя после нуля тока. В частности, добавление вблизи электродов дополнительных газовых объемов приводит к улучшению

отключающей способности таких разрядников [14]. Предполагается, что поток газа из этих объемов после прохождения импульса тока обеспечивает дополнительное охлаждение остаточного канала [15].

Развитие данного способа повышения отключающей способности защитных разрядников может быть сопряжено с использованием метода синхронной газовой инжекции (с.г.и.) в мощных выключателях тока [16, 17], т.е. с впрыском холодного газа в область горения дуги в период прохождения тока через ноль. При импульсном впрыске в строго определенный момент времени [18] холодный газ, взаимодействуя с остаточным следом плазмы, поглощает энергию дуги, выделяемую в межконтактном промежутке, способствует деформации дуг отключения, повышает турбулизацию потока и ускоряет процесс деионизации и восстановления электрической прочности между дугогасительными контактами.

Описанный ниже экспериментальный стенд предназначен для исследования эффективности дугогашения с помощью с.г.и. и определения оптимальных параметров воздействия на дугу. Стенд построен на основе существующей инфраструктуры стендов для испытания молниезащитных устройств [19] и мощных коммутаторов тока [20—22].



**Рис. 1.** Схема испытательного стенда.  $C_1$  – конденсаторная батарея;  $X_1$  – токовый коллектор;  $L_1$  – индуктивный реактор;  $R_1$  – схема формирования переходного восстанавливающегося напряжения;  $Q_1$  – нагрузка;  $K_1$  – воздушный разрядник (тригатрон);  $F_1$  – проволочка;  $K_2$  – тиристорный ключ;  $C_3$  – конденсаторная батарея для взрыва проволочки.

# 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для исследования дугогасительных процессов включает в себя разрядную камеру, рассчитанную на токи амплитудой до 500 кА и импульсное давление до 10 МПа, разрядный контур и систему газоподачи, обеспечивающую впрыск холодного газа в камеру в заданное время. Электрическая схема стенда показана на рис. 1. Основной разрядный контур состоит из конденсаторной батареи  $C_1$  емкостью 38 м $\Phi$ , индуктивности  $L_1$  250 мкГн и схемы  $R_1$ – $C_2$  формирования переходного восстанавливающегося напряжения. При таких значениях емкости и индуктивности длительность первого полупериода тока составляет 10 мс, т.е. моделируется промышленная частота 50 Гц. Батарея  $C_1$  соединена с остальными элементами комплекса через токовый коллектор  $X_1$ . Она коммутируется на нагрузку  $Q_1$ при помощи двух воздушных разрядников (тригатронов)  $K_1$ . Параметры разрядной цепи рассчитаны так, чтобы удовлетворить требованиям, предъявляемым к испытаниям выключающих аппаратов переменного тока [23, 24].

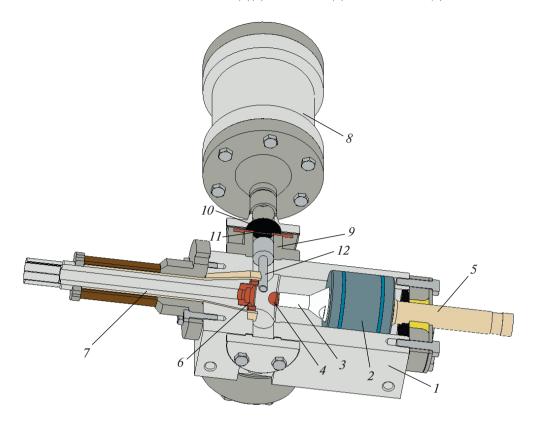
На рис. 2 представлена общая схема разрядной камеры, а на рис. 3 — разрядная камера на испытательном стенде. Корпус разрядной камеры (1 на рис. 2) выполнен из нержавеющей стали, внутри камеры находится подвижный поршень 2 из полиацетали, который позволяет моделировать расхождение контактов. К поршню крепится держатель электродов 3, который соединен с земляной шиной при помощи гибких медных проводов, проложенных в поликарбонатовой трубке 5, проходящей через поршень. На противоположный конец держателя электродов навинчен стрежневой электрод 4. Второй электрод 6 имеет форму кольца и крепится на токовводе 7, изолированном от корпуса камеры. К токовводу подключена

шина высокого напряжения. Токоввод полый, с внутренним диаметром 25 мм, через отверстие в токовводе газ, нагретый дугой, истекает из камеры. Стержневой электрод изготовлен из псевдосплава МВД (50% Мо, 40% W, 10% Cu), кольцевой электрод — из МВД или меди.

Перпендикулярно оси камеры расположены два диагностических окна, через которые может проводиться высокоскоростная съемка. В корпусе камеры также имеется отверстие для измерения импульсного давления в разрядном объеме.

Система газоподачи включает в себя 50-литровый баллон со сжатым газом (азот, воздух), который при помощи гальванически развязанной от установки газовой магистрали соединен с литровым объемом 8 для впрыска газа. Между литровым баллоном и разрядной камерой размещен диафрагменный узел 9, изготовленный из ударопрочного поликарбоната. Диафрагма 10 составлена из 2-4 слоев лавсановой пленки толщиной 75 мкм. Давление разрыва диафрагмы из одного слоя пленки составляет примерно 1.2 МПа, из 4-х слоев — примерно 4.8 МПа. Между слоями пленки проложена медная проволочка (11 на рис. 2 и  $F_1$  на рис. 1), подключенная к схеме поджига, которая может запускаться с регулируемой задержкой. Взрыв проволочки вызывает разрыв диафрагмы, что позволяет обеспечить нужный момент впрыска газа в камеру. Продув газа из объема 8 через разрядную камеру осуществляется через трубку 12 с внутренним диаметром 12 мм на выходе из диафрагменного узла; ее конец расположен между электродами на расстоянии примерно 3 см от оси камеры.

Электрическая схема поджига проволочки в диафрагменном узле показана на общей схеме на рис. 1. Взрыв проволочки  $F_1$  происходит при разряде конденсатора  $C_3$  через тиристорный ключ  $K_2$ . Времена начала разряда основного контура и



**Рис. 2.** Разрядная камера. 1 — корпус разрядной камеры; 2 — подвижный поршень; 3 — держатель электродов; 4 — стержневой электрод; 5 — трубка с токопроводом; 6 — кольцевой электрод; 7 — токоввод; 8 — газовый объем; 9 — диафрагменный узел; 10 — диафрагма; 11 — взрывающаяся проволочка; 12 — газовое сопло.

взрыва проволочки в диафрагменном узле задавались синхроимпульсами sync1 и sync2 с генератора задержанных импульсов.

## 3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Описание методов диагностики и системы измерений, реализованных на стенде и использовавшихся при проведении экспериментов, представлено в работе [21]. Разрядный ток измеряли поясом Роговского. Для измерения падения напряжения на дуге использовались два высокоомных резистивных делителя 1:1000 с емкостной развязкой. Первый подключался к токовводу (7 на рис. 2), а второй — к месту соединения идущих от держателя электродов 3 гибких медных проводов с токоведущей земляной шиной. Величина падения напряжения на дуге определялась как разность между сигналами делителей. Для регистрации импульсного давления в разрядной камере использовался пьезоэлектрический датчик мембранного типа Т-500 (ФКП НИИМ, Нижний Тагил, Россия). В проведенных экспериментах межэлектродное расстояние составляло 2.5 см, разрядный объем был примерно равен 0.5 дм<sup>3</sup>. Разряд инициировался при помощи медной проволочки диаметром 0.3 мм, соединяющей в начальный момент электроды. Кольцевой электрод в начальный момент при инициировании дуги служил анодом.

Эксперименты на установке проводились следующим образом. В баллон 8 закачивался газ до давления 3 МПа. Затем конденсаторная батарея заряжалась до необходимого напряжения, и осуществлялся запуск тригатронов, регистрирующей аппаратуры и, с необходимой задержкой, схемы разрыва диафрагм.

Давление в объеме 8 выбиралось на основе оценочных расчетов [18], которые показали, что для эффективного локального охлаждения канала разряда на нашей установке необходимо, чтобы впрыск холодного газа в область горения дуги начинался за 2—3 мс до прохождения тока через ноль, а давление на срезе инжекционной трубки превышало давление в разрядном объеме не менее чем в два раза. Согласно данным отладочных экспериментов, при зарядном напряжении батареи 1.5—2.5 кВ в указанный промежуток времени давление в разрядной камере составляет 0.5—1 МПа. Таким образом, при начальном давлении в инжекторном объеме примерно 3 МПа указанное выше условие должно выполняться.



Рис. 3. Разрядная камера на испытательном стенде.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

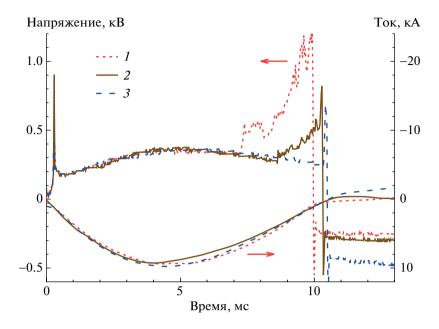
На рис. 4 представлены осциллограммы падения напряжения на разрядном промежутке и тока в цепи при зарядном напряжении батареи 2 кВ, а на рис. 5 показаны соответствующие сигналы давления в разрядной камере при формировании с.г.и. на 6-й, 8-й и 10-й миллисекунде от начала тока (т.е. за 4 и 2 мс до и в момент перехода тока через ноль). При подаче холодного газа в разрядный промежуток регистрировались соответствующее повышение давления в разрядной камере и синхронный с ним рост падения напряжения на дуге.

Действие с.г.и. на область горения дуги длится ~1.5—2 мс. После разрыва диафрагмы за время ~300 мкс формируется квазистационарная сверхзвуковая газовая струя, продувающая область

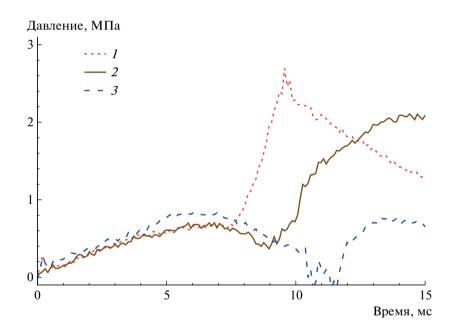
разрядного канала в течение  $\sim 1.5$  мс до соответствующего снижения давления в литровом объеме. Теневые изображения формирования струи после разрыва диафрагмы показаны на рис. 6.

Процесс деформации и гашения дуги под действием с.г.и. при газовой инжекции начиная с 8 мс от начала разряда показан на скоростных фотографиях на рис. 7, которые соответствуют эксперименту, показанному на рис. 4 и 5 семейством кривых 2.

При слишком ранней и поздней организации газового дутья происходит повторное зажигание дуги после прохождения нуля тока. На рис. 4 на кривой 3 присутствует обратная полуволна тока, что свидетельствует о повторном зажигании дуги при поздней организации газового дутья с 10-й миллисекунды. При оптимальном выборе време-



**Рис. 4.** Разрядный ток и напряжение на разрядном промежутке при начале газовой инжекции начиная с: 6-й (1), 8-й (2), 10-й миллисекунды (3).



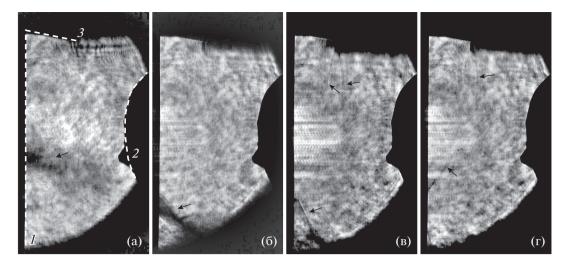
**Рис. 5.** Давление в разрядной камере при начале газовой инжекции начиная с: 6-й (I), 8-й (2), 10-й миллисекунды (3). Ток и напряжение показаны на рис. 4.

ни с.г.и. происходит гашение дуги, и на осциллограмме отсутствует обратная полуволна тока.

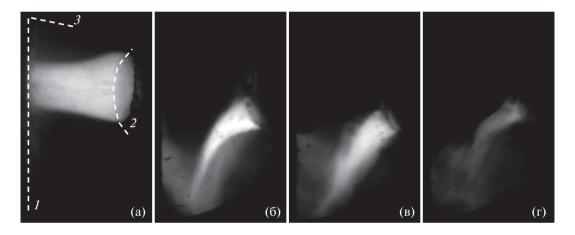
# 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана экспериментальная установка для моделирования и исследования воздействия с.г.и. на гашение мощной дуги в защитных выключаю-

щих устройствах. Параметры экспериментов были близки к характерным для газоразрядных молниезащитных устройств. Предварительные результаты, полученные на установке, показали, что использование с.г.и. повышает отключающую способность таких устройств. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию реализации метода с.г.и. с целью повышения от-



**Рис. 6.** Теневые фотографии формирования струи холодного газа в разрядной камере после разрыва диафрагмы: 1 – кольцевой электрод, 2 – стержневой электрод, 3 – торец газового сопла. Стрелками показаны скачки плотности на фронте и границе импульсной струи. Время между кадрами 100 мкс.



**Рис. 7.** Скоростные изображения ( $\mathbf{a}$ — $\mathbf{r}$ ) воздействия струи холодного газа на дугу при газовой инжекции начиная с 8-й миллисекунды при времени между кадрами 400 мкс: I — кольцевой электрод, 2 — стержневой электрод, 3 — торец газового сопла. Время первого кадра соответствует 8-й миллисекунде эксперимента, представленного семейством кривых 2 на рис. 4 и 5.

ключающей способности и адаптацию метода к технически и экономически оправданному использованию в реальных защитных устройствах.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- European Commission. Energy. Roadmap 2050. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012
- 2. Чубраева Л.И., Ронжин Ан.Л., Шишлаков А.В., Ронжин Ал.Л., Шишлаков В.Ф. // Труды СПИИРАН. 2014. № 2 (33). С. 207.
- 3. *Александров Г.Н.* Молния и молниезащита / Под ред. В.Н. Козлова. М.: Наука, 2008.
- Use of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines. Working group CIGRE C4.301. 2010. Electra—CIGRE Report № 440.

- 5. Lightning Interaction with Power Systems: Fundamentals and Modelling. V. 1. Energy Engineering / Ed. by A. Piantini. Croydon: Institution of Engineering and Technology, 2020.
- 6. *Подпоркин Г.В.* Молниезащита воздушных линий электропередачи. СПб.: Родная Ладога, 2015.
- 7. Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Рутберг Ф.Г. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 23. С. 49.
- 8. *Пинчук М.Э., Будин А.В., Кумкова И.И., Чусов А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. № 8. С. 10.
- 9. Pinchuk M.E., Budin A.V., Kumkova I.I., Bogomaz A.A., Sivaev A.D., Chusov A.N., Zaynalov R.I. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 774. № 1. P. 012187. https://doi.org/10.1088/1742-6596/774/1/012187

- 10. *Jia W., Sima W., Yuan T., Yang M., Sun P.* // Energies. 2018. V. 11. № 12. P. 3335. https://doi.org/10.3390/en11123335
- 11. *Runge T., Kopp T.H., Kurrat M.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. V. 46. № 8. P. 2935. https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2850364
- Liu Y., Wu G., Liu K., Guo Y., Zhang X., Shi C. // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 90035. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994249
- 13. *Sima W., Jia W., Yuan T., Yang M., Cheng H., Zuo S.* // Physics of Plasmas. 2021. V. 28. № 6. P. 63510. https://doi.org/10.1063/5.0040134
- 14. Chusov A., Rodikova E., Murmann M., Nordborg H., Fuchs R. // Plasma Physics and Technology Journal. 2017. V. 4. P. 273. https://doi.org/10.14311/ppt.2017.3.273
- 15. *Подпоркин Г.В.* Частное сообщение. НПО ОАО "Стример" (www.streamer.ru).
- 16. *Briggs A.*, *King L.* // IEE Conf. Dev in Design and Performance. London, 1979. P. 52.
- Briggs A. // Proc. of the 7th International Conference on Gas Discharges and their Applications. London, 1982. P. 28.

- 18. *Kurakina N.K., Frolov V.Y., Tonkonogov E.N.* // Plasma Physics and Technology. 2019. V. 6. № 2. P. 3. https://doi.org/10.14311/ppt.2019.1.43
- 19. Будин А.В., Пинчук М.Э., Пильщиков В.Е., Лекс А.Г., Леонтьев В.В. // ПТЭ. 2016. № 5. С. 55. https://doi.org/10.7868/S0032816216040200
- 20. Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Леонтьев В.В., Куракина Н.К. // ПТЭ. 2017. № 6. С. 61. https://doi.org/10.7868/S0032816217060039
- Budin A.V., Pinchuk M.E., Leontev V.V., Leks A.G., Kurakina N.K., Kiselev A.A., Simakova J.V., Frolov V.Y. // 22nd Symposium on Physics of Switching Arc. FSO 2017 (Nové Město na Moravě, Czech Republic, 2017). 2017. P. 120. https://doi.org/10.14311/ppt.2017.2.120
- 22. Pinchuk M.E., Budin A.V., Kurakina N.K., Leks A.G. // 23rd Symposium on Physics of Switching Arc 2019. FSO 2019 (Nové Město na Moravě, Czech Republic, 2019). 2019. P. 227. https://doi.org/10.14311/ppt.2019.3.227
- 23. ГОСТ16357-83. Разрядники вентильные переменного тока на номинальные напряжения от 3.8 до 600 кВ. М.: Стандартинформ, 1983.
- 24. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. М.: Стандарт-информ, 2006.