

УДК 621.316.545

## Конструирование, разработка и исследование отключающей способности газонаполненного высоковольтного разъединителя\*

Д.В. ЧЕРНОСКУТОВ<sup>1</sup>, И.В. ЧЕРНЫХ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 620000, РФ, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Уральский федеральный университет имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, аспирант. E-mail: chernoskutov1989dv@mail.ru

<sup>2</sup> 620000, РФ, Екатеринбург, ул. Мира, 19, Уральский федеральный университет имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, доктор технических наук. E-mail: chernykh@inbox.ru

Высоковольтные разъединители предназначены для обеспечения видимого разрыва при проведении ремонтных и эксплуатационных работ. Классические воздушные разъединители основаны на гашении дуги и обеспечении видимого разрыва в воздушной среде. В связи с ростом потребности на компактную коммутационную аппаратуру в промышленных и городских зонах вопрос разработки компактных гибридных аппаратов с элегазовой изоляционной и дугогасительной средой, позволяющих значительно снизить площадь подстанции и объем средств на строительно-монтажные работы, становится все более актуальным. Статья связана с разработкой компактного элегазового распределительного устройства с модулем разъединитель–заземлитель, совместимого с элегазовым баковым выключателем ВЭБ-110 на класс напряжения 110 кВ. Особое внимание уделено режиму коммутации уравнильного тока 1600 А на соответствие требованиям международного стандарта МЭК 62271-102 и контролю времени горения дуги в зависимости от количества выполненных операций. В статье описаны стадии разработки с применением современных техник конструирования в пакете Unigraphics NX и численного моделирования в пакете ANSYS, фиксации электрофизических параметров, оценки отключающей способности различных токовых величин с последующей обработкой экспериментальных результатов. Рассматриваемая статья представляет фундаментальное исследование изолирующей функции, а также отключающей способности в основных коммутационных режимах. Подтвержден необходимый диэлектрический уровень межконтактного промежутка. Подтверждена коммутационная способность и определены диапазоны времени горения дуги при отключении различных токов.

**Ключевые слова:** элегазовое распределительное устройство, уравнильный ток, изоляция, диэлектрический уровень, электрическая дуга, нуль тока, эрозия, время горения дуги

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-108-119

---

\* Статья получена 18 февраля 2015 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтное оборудование подстанций требует модернизации [1, 2], замены устаревших конструктивно-технических решений и повышения надежности электроснабжения. Большая часть исследований [3–8] компактных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ) была направлена на моделирование, измерение и подавление переходных перенапряжений, создаваемых при коммутации КРУЭ. Новые виды компактных коммутационных распределительных устройств [9, 10] должны отвечать всем современным требованиям: компактность, независимость от условий окружающей среды, минимальное техническое обслуживание, безопасность обслуживающего персонала, высокая отключающая способность, стабильность времен горения дуги и малый износ контактов [11]. На настоящее время нет экспериментальных данных о процессах отключения, времени горения дуги разъединителей в составе газонаполненных гибридных распределительных устройств наружной установки с повышенной величиной уравнильного напряжения 100 В. Статья связана с исследованием процессов гашения и времени горения дуги при коммутации уравнильного тока с повышенной величиной напряжения компактным разъединителем в изоляционной среде элегаз–хладон [12].

## 1. КОНСТРУИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

На первой стадии была разработана 3D модель модуля разъединителя-заземлителя на класс напряжения 110 кВ. Затем модель была проанализирована с использованием пакета моделирования ANSYS. Постановка задачи электростатики включала в себя определение наибольших напряженностей электрического поля и выбор оптимальных радиусов кривизны электродов и элементов конструкции. Критическая напряженность электрического поля может быть подсчитана с помощью выражения

$$A_{50\%} = A \cdot p + B,$$

где  $A$  и  $B$  – эмпирические коэффициенты,  $p$  – давление заполнения [13, 14].

Анализ напряженности электрического поля и его оптимизация в среде ANSYS позволили снизить напряженность поля до 25,3 кВ/мм. Полученная с помощью численного анализа величина напряженности меньше, чем рассчитанная по [13]:  $E_{50\%(-)} = 28,76$  кВ/мм, и удовлетворяет требованию  $E_{\max} < E_{50\%}$  (отрицательная полярность). Полученная картина распределения электрического поля представлена на рис. 1 и по характеру схожа с картиной, представленной в [15].

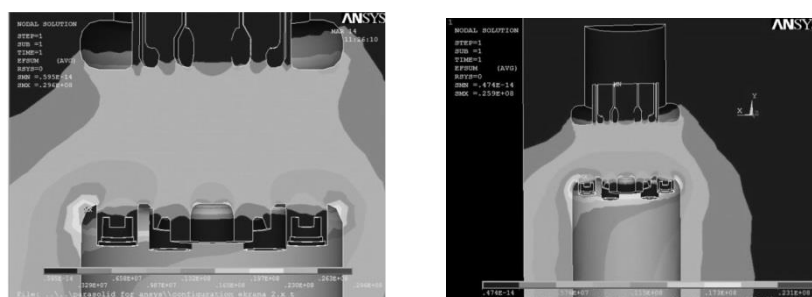


Рис. 1. Распределение напряженности электрического поля начальной конструкции (слева) и оптимизированной конструкции (справа)

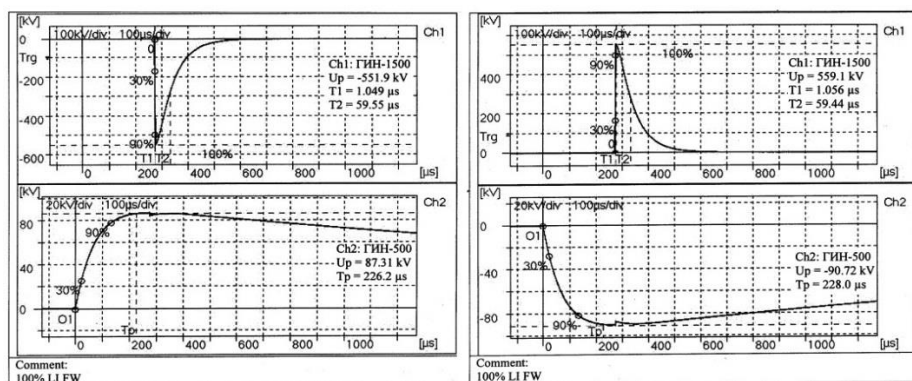


Рис. 2. Грозовой импульс отрицательной (слева) и положительной полярностей (справа)

Разъединитель с выбранными параметрами межконтактного промежутка и контактов (форма электродов и конфигурация экрана) отвечает требованиям стандартов ГОСТ52726-2007 [16] и МЭК 62271-102 [17]. Выбранные параметры межконтактного промежутка и контактных групп гарантируют необходимый уровень изоляции. Выполненная серия высоковольтных испытаний подтвердила требуемый диэлектрический уровень между контактами. На рис. 2 представлена осциллограмма высоковольтных испытаний разъединителя грозойм импульсом.

## 2. ИСПЫТАНИЯ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Коммутационные испытания были проведены в испытательном центре ЗАО «Эльмаш (УЭТМ)», Россия, Екатеринбург. Несмотря на то что исследуемый разъединитель является газовым с заполнением элегазом и хладном, величина уравнивающего напряжения была выбрана равной 100 В вместо 10 В как для разъединителей в составе КРУЭ. Ввиду отсутствия четкого требования МЭК 62271-102 по выбору величины уравнивающего напряжения при испытании газонаполненных разъединителей в составе распределительных устройств наружной установки с воздушной ошиновкой, предназначенных для установки на классические подстанции, данный разъединитель был испытан в более жестких условиях.

Дугогасительные контакты подвергаются воздействию дуги и должны обладать высокой дугостойкостью от воздействия высокотемпературной электрической дуги [11]. Все дугогасительные контакты по составу содержали 80 % вольфрама и 20 % меди. Элегазовый разъединитель был разработан и испытан в трех вариантах одинаковой геометрии, конструкции и одинаковых материалов контактов, но различной зернистости порошка и технологий производств от трех производителей. В соответствии с требованиями стандарта МЭК 62271-102 все коммутационные испытания были выполнены при минимальном абсолютном давлении оперирования смеси элегаз–хладон 0,6 МПа и минимальном напряжении цепей питания привода для обеспечения наиболее тяжелых кинематических и дугогасительных условий. Величина уравнивающего напряжения при коммутационных ис-

пытаниях находилась в диапазоне 100...102 В. Коэффициент мощности испытательной схемы составил 0,14.

Интервал времени между циклами включение–отключение был достаточным для охлаждения контактов до требуемой температуры. Величина тока измерялась через установленный трансформатор тока класса точности 0,2. Сигнал был измерен и оцифрован регистратором электрических сигналов РЭС – 03 с частотой дискретизации 15 кГц и разрешением 12 бит.

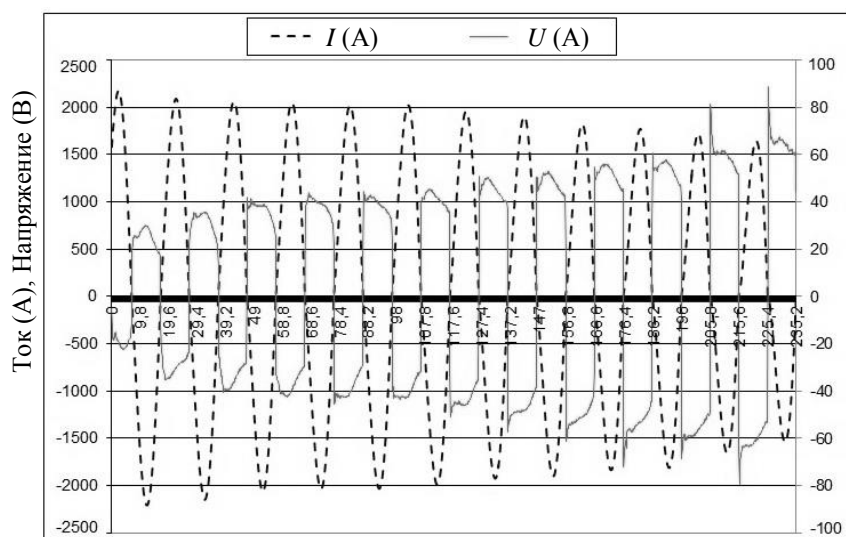


Рис. 3. Оциллограмма процесса отключения со средним временем горения дуги 235 мс

Существующие исследования зарубежных авторов [18–22] в части коммутации детально не рассматривают электрофизические процессы, происходящие при отключении больших токовых величин. В текущем исследовании были зафиксированы основные параметры электрической дуги: ток, падение напряжения, сопротивление, проводимость, мощность, выделяемая в дуге. Эти параметры являются взаимосвязанными. Из рис. 4 очевидно, что сопротивление дуги ( $R$ ) имеет максимальную величину в нуле тока, в то время как проводимость ( $G$ ) равна нулю. В конце последнего полупериода промышленной частоты напряжение на дуге ( $U$ ) достигает своего максимума, приводя к повышению электрической прочности межконтактного промежутка, таким образом, сопротивление промежутка возрастает до бесконечности. Рисунок 4 иллюстрирует отдельные стадии процесса отключения, зафиксированные специальной инфракрасной видеокамерой, установленной в смотровом окне.

Коммутационные испытания показали, что дугогасительные контакты одинаковой геометрии и композиции материалов, но разной степени зернистости исходного материала и технологии производства имеют различные массовые износы и рост времени горений дуги. Рис. 5 иллюстрирует корреляцию времени горения дуги от количества выполненных операций. Корреляция выполнена с помощью аппроксимирующих выражений с параметром  $R^2$  – величина достоверности аппроксимации. После этого коммутаци-

онные испытания были повторены при меньшей величине уравнительного напряжения – 20 В. Испытания показали отсутствие эрозийного износа и стабильность времени горения дуги. На рисунке 5 время горения дуги показано при номинальной величине цепей питания электромагнитного привода – 220 В в течение первых 61 операций отключения, а также при минимальной величине напряжения цепей питания привода 187 В в течение еще 100 операций отключения тока 1600 А. Уменьшение напряжения цепей питания привода привело к повышению времени горения дуги примерно на 25 %.

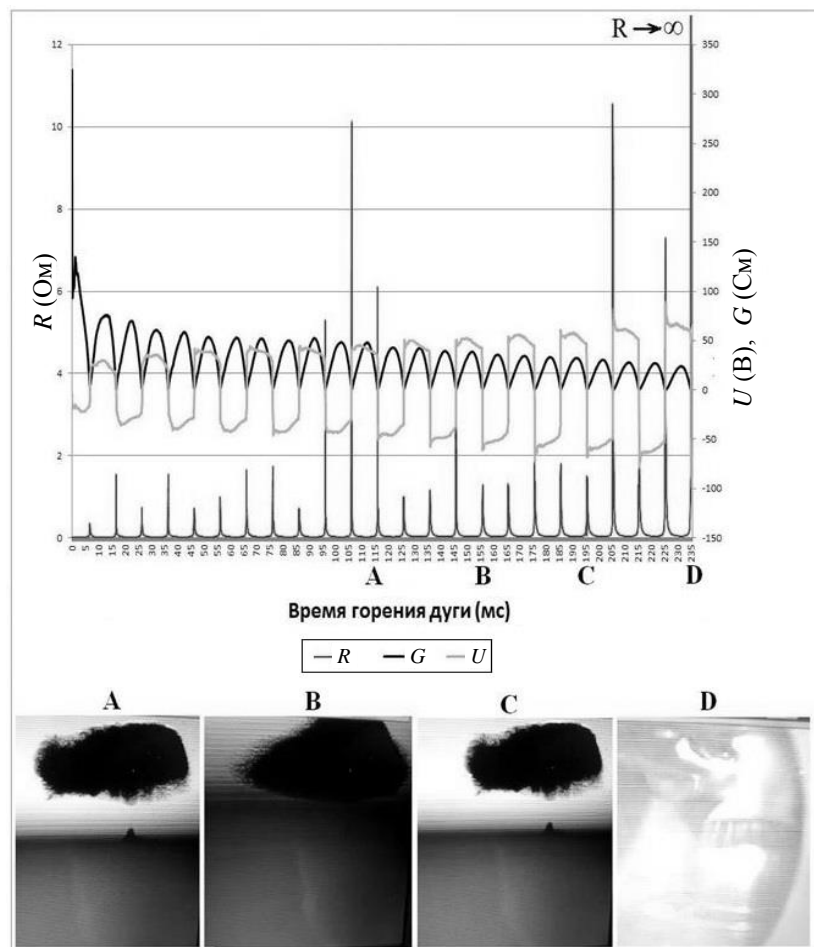


Рис. 4. Процесс отключения со средним временем горения дуги 235 мс: падение напряжения на дуге, сопротивление, проводимость

При анализе дуговых процессов необходимо рассматривать вольт-амперные характеристики [23]. Точки  $A_1$  и  $A_2$  соответствуют моментам времени появления тока. Эти точки называются напряжением зажигания. Точки  $B_1$  и  $B_2$  соответствуют моментам погасания тока, соответственно,  $B_1$  и  $B_2$  – напряжения погасания дуги. Точки  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  и  $B_2$  показаны для последнего периода промышленной частоты процесса отключения тока 1600 А при уравнительном напряжении 100 В.

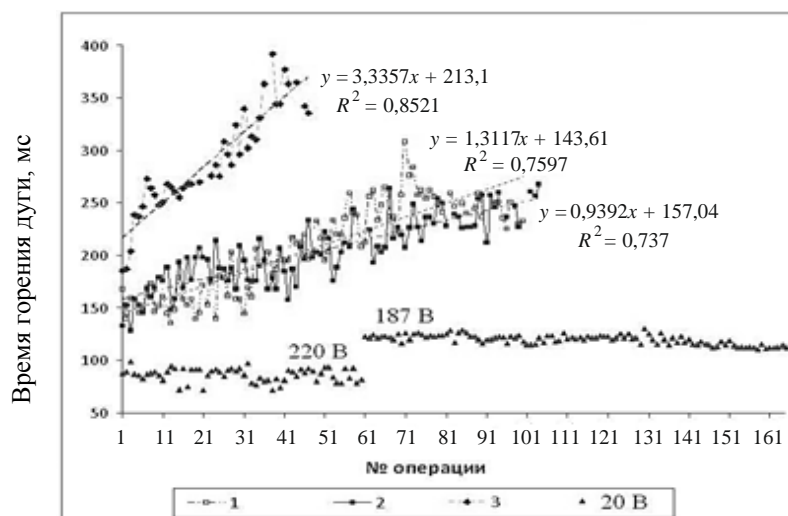


Рис. 5. Время горения дуги

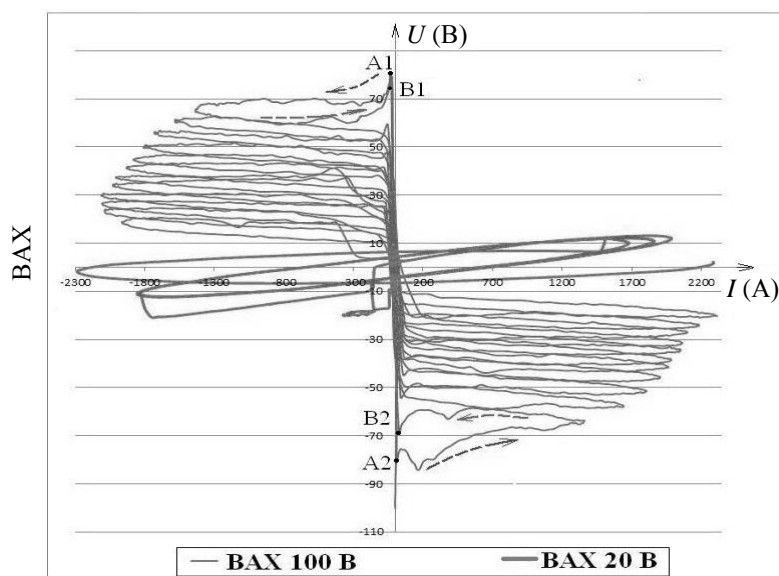


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики при уравнительном напряжении 20 и 100 В

Рисунок 7 иллюстрирует напряжения на дуге 100 В (при минимальном, среднем и максимальном времени горения дуги) и 20 В уравнительного напряжения. Характер нарастания напряжения на дуге 20 В уравнительного напряжения существенно отличается от характера нарастания напряжения 100 В, который определяет выделяемые дугой мощности (рис. 8).

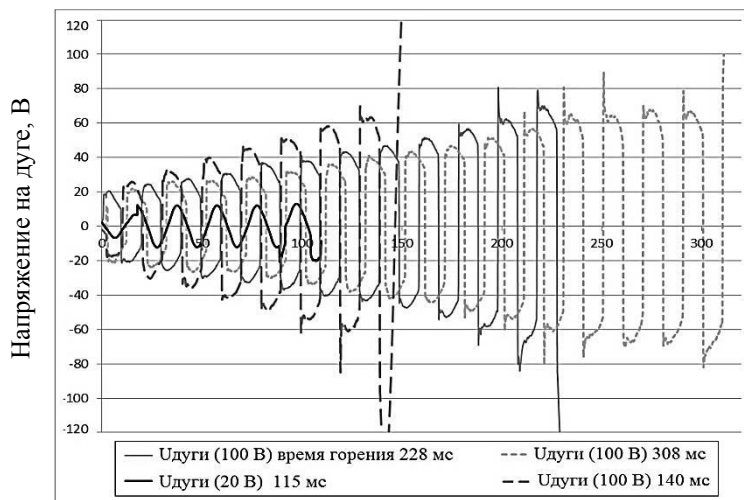


Рис. 7. Напряжения на дуге в режимах коммутации уравнивающего напряжения 20 и 100 В

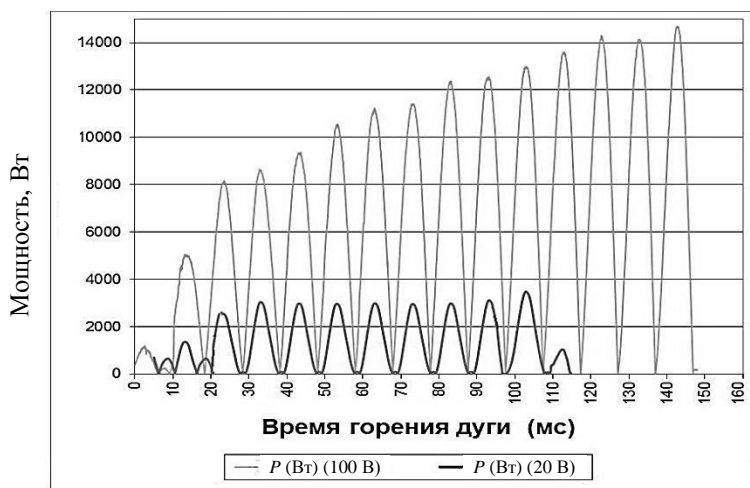


Рис. 8. Выделяемые дугой мощности в режимах коммутации уравнивающего напряжения 20 и 100 В



Рис. 9. Изношенный дугогасительный контакт после 100 операций – 100 В (слева) и дугогасительный контакт после 160 операций – 20 В

Отключающая способность разработанного газонаполненного разъединителя была подтверждена в режимах коммутации тока заряда шин 2А при испытательном напряжении 73 кВ – 50 опытов и ненагруженного трансформатора 2А при испытательном напряжении 73 кВ – 20 опытов. Исследования были проведены в Испытательном центре высоковольтной аппаратуры ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» (протоколы № 012-201-2013, № 012-209-2013). Предшествующие исследования авторов [24] режима коммутации тока заряда шин не давали данных о времени горения дуги в смеси элегаз–хладон при отключении малых токовых плотностей при высоком испытательном напряжении. После всего цикла коммутационных испытаний разъединитель сохранил свою работоспособность с обеспечением всех функций.

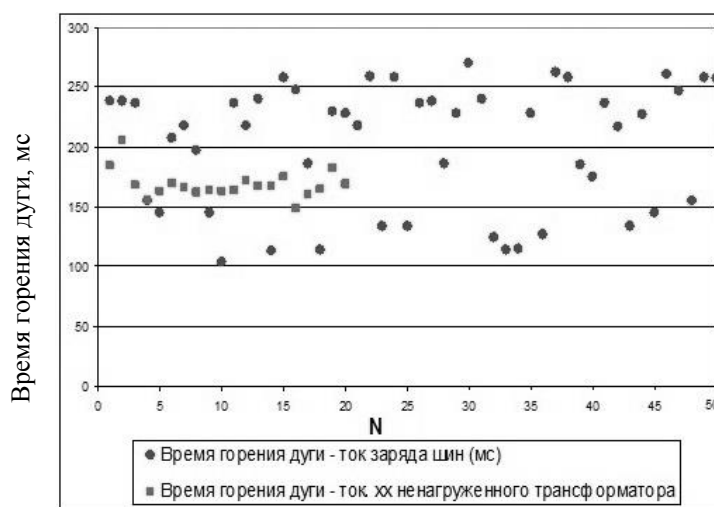


Рис. 10. Время горения дуги

На рис. 11 представлено процентное распределение времени горения дуги по диапазонам в режиме коммутации тока заряда шин 2А.

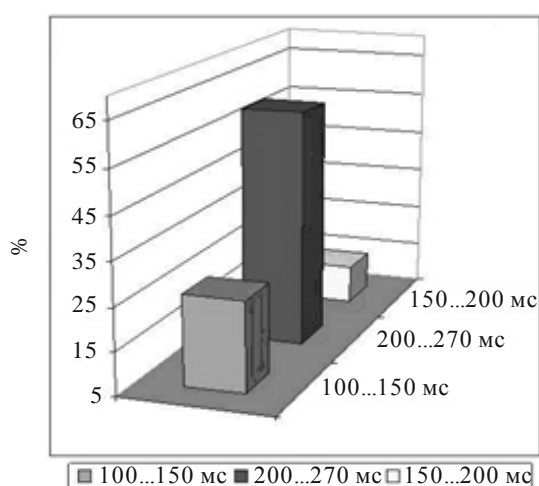


Рис. 11. Распределение времени горения дуги в режиме коммутации тока заряда шин 2А



## ВЫВОДЫ

1. В данной статье были исследованы зависимости изменений времени горения дуги от количества выполненных операций при 20 В и 100 В. При 100 В уравнивающего напряжения зависимости имеют возрастающий характер. Полученные результаты при величине уравнивающего напряжения 100 В отличаются от результатов, представленных в [9, 25]. Увеличение величины уравнивающего напряжения до 100 В приводит к эрозии контактов и увеличению времени горения дуги, которое нестабильно на протяжении 100 операций. Тем не менее разработанный газонаполненный разъединитель с образцами 2 и 3 показал достаточную отключающую способность. После всего цикла испытаний разъединитель сохранил свою работоспособность и фундаментальные функции.

2. Отключение уравнивающего тока – сложный мультифакторный процесс, зависящий как от ряда конструктивных характеристик – скорости движения контактов, межконтактного промежутка, материала, степени зернистости, технологии производства дугогасительных контактов, изолирующей и дугогасительной среды, так и от электрофизических параметров – уравнивающего напряжения, тока, скорости нарастания электрической прочности, изменения распределения напряженности электрического поля от опыта к опыту.

3. Улучшение существующей конструкции в части уменьшения времени горения дуги, снижения износа контактов и увеличения ресурса может быть достигнуто за счет применения системы магнитного гашения дуги [22].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Развитие производства основного электротехнического оборудования в России для электроэнергетических сетей напряжением 110 кВ и выше / М.Ю. Львов, К.А. Лунин, М.А. Панфилов, А.Н. Ивашкин, М.М. Львова // Энергоэксперт. – 2013. – № 5 (40). – С. 70–74.
2. *Timmerman H., Groeman J.F.* Developments towards H.V. substations without disconnector switches and with modern control systems // IEEE Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400V-145kV for Utilities and Private Networks, London, 10–12 November 1998. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 1998. – N 459. – P. 40–45. – doi: 10.1049/cp:19980738.
3. New methods of damping very fast transient overvoltages in gas-insulated switchgear / S. Burow, U. Straumann, W. Kihler, S. Tenbohlen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2014. – Vol. 29, iss. 5. – P. 2332–2339. – doi: 10.1109/TPWRD.2014.2328013.
4. *Lin X., Wang N., Xu J.* Arcing model of a disconnector and its effect on VFTO // Plasma Science and Technology. – 2013. – Vol. 15, N 7. – P. 644–647.
5. Influence of the switching speed of the disconnector on very fast transient overvoltage / Shu Y., Han B., Lin J.-M., Chen W., Ban L., Xiang Z., Chen G. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2013. – Vol. 28, iss. 4. – P. 2080–2084. – doi: 10.1109/TPWRD.2013.2273620.
6. *Lalot J., Sabot A., Kieffer J.* Dielectric behavior of GIS switching disconnectors comparison of possible phase opposition tests // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1988. – Vol. 3, iss. 1. – P. 214–222. – doi: 10.1109/61.4248.
7. *Okabe S., Yuasa S., Kaneko S.* Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms – analysis and generation circuit of non-standard lightning impulse waveforms in actual field // IEEE Transactions on Dielectrics and Electric Insulation. – 2013. – Vol. 14, iss. 2. – P. 312–320. – doi: 10.1109/TDEI.2007.344609.
8. Suppression of VFT in 1100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnector / Y. Yamagata, K. Tanaka, S. Nishivaki, N. Takahashi, T. Kokumai, I. Miwa, T. Komukai, K. Imai // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, iss. 2. – P. 872–880. – doi: 10.1109/61.489346.
9. *Bojic P.* Bus transfer current switching in GIS by disconnector application, design criteria and testing // International Conference on Electric Power Engineering, PowerTech Budapest 99, Budapest, Hungary, 29 August – 02 September 1999. – Piscataway, New Jersey: IEEE, 1999. – INSPEC Accession N 6504213. – doi: 10.1109/PTC.1999.826712.
10. Disconnector switching in GIS: three-phase testing and phenomena / R. Smeets, W.A. van der Linden, M. Archterkamp, G. Damstra., E.M. de Meulemeester // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2000. – Vol. 15, iss. 1. – P. 122–127. – doi: 10.1109/61.847239.

11. Zhang J.L., Jiu D.Y., Fang M.T.C. Electrode evaporation and its effects on thermal arc behavior // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2004. – Vol. 32, iss. 3. – P. 1352–1356. – doi: 10.1109/TPS.2004.827606.
12. Christophorou L.G., Olthoff J.K., Green D.S. Gases for electrical insulation and arc interruption: possible present and future alternatives to pure SF<sub>6</sub>: technical note N 1428 / National Institute of Standards and Technology. – Washington: U.S. Government printing office, 1997. – 48 p.
13. Полтев А.И. Конструкции и расчет элегазовых аппаратов высокого напряжения. – Л.: Ленэнерго, 1979. – 239 p.
14. Insulation characteristics for very fast transient overvoltage / S. Okabe, M. Koto, F. Endo, K. Kobayashi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, iss. 1. – P. 210–218. – doi: 10.1109/61.484018.
15. Design, simulation and testing of an EHV metal enclosed disconnecter / J. Lopez-Roldan, T. Irwin, S. Nurse, C. Ebden, J. Hansson // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2001. – Vol. 16, iss. 4. – P. 558–563. – doi: 10.1109/61.956737.
16. ГОСТ 52726–2007. Разъединители и заземлители переменного тока на напряжение свыше 1 кВ и приводы к ним. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 51 с.
17. International Standard IEC 62271–102. High-voltage switchgear and controlgear. Pt. 102: Alternating current disconnectors and earthing switches. – Ed. 1.1, 2012–02. – Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2012. – ISBN 978-2-88912-832-7.
18. Current interruption by disconnecting switch and earthing switch in GIS / K. Suzuki, H. Mizoguchi, N. Shimokawara, V. Murayama, S. Yanabu // IEEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution. – 1984. – Vol. 131, iss. 2. – P. 54–60. – doi: 10.1049/ip-c.1984.0008.
19. High current interruption, by SF<sub>6</sub> disconnecting switches in GIS / S. Yanabu, S. Nishiwaki, H. Mizoguchi, N. Shimokawara, V. Murayama // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1982. – Vol. PAS-101, iss. 5. – P. 1105–1114. – doi: 10.1109/TPAS.1982.317372.
20. Development of UHV gas circuit breaker and disconnecting switch, and their performance tests / S. Yanabu, M. Ohishi, Y. Ozaki, Y. Murayama // Proceedings of the CIGRÉ Symposium: High Currents in Power Systems Under Normal, Emergency and Fault Conditions, Brussels, Belgium, June 3–5, 1985. – Brussels: The Symposium, 1985. – Paper N S06–85. – P. 320-02/1–320-02/6.
21. New development of 800 kV gas insulated switchgears / S. Yanabu, Y. Ozaki, M. Oishi, Y. Murayama // Toshiba review. – 1984. – Vol. 39–8. – P. 709–712.
22. Development of 800 kV GIS / H. Toda, Y. Ozaki, I. Miwa, S. Nishiwaki, V. Murayama, S. Yanabu // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, iss. 1. – P. 316–323. – doi: 10.1109/61.108924.
23. Kapetanovich M. High voltage circuit breakers. – Sarajevo: Faculty of Electrotechnical Engineering, 2011. – 648 p. – ISBN 978-9958-629-39-6.
24. Disconnector switching of charging currents in metal-enclosed SF<sub>6</sub> gas insulated switchgears at EHV / A. Edinger, G. Mauthe, F. Pinnekamp, D. Schlicht, W. Schmidt // CIGRE International Conference on Large High Voltage Electric Systems, 29 August – 6 September 1984. – Paris, 1984. – Sess. papers N 13–14.
25. SF<sub>6</sub> alternative development for high voltage switchgears / Y. Kieffel, A. Girodet, F. Biquez, Ph. Ponchon, J. Owens, M. Costello, M. Bulinski, R. Van San, K. Werner // CIGRE Session 45, 24–29 August, 2014, Paris, International Council on large Electric Systems. – Paris, 2014. – Conf. paper N D1–305.

*Черноскутов Дмитрий Владимирович*, аспирант кафедры техники высоких напряжений Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина, инженер-исследователь лаборатории коммутационных испытаний ООО «Эльмаш (УралЭлектроТяжмаш)». Основное направление научных исследований – повышение отключающей способности высоковольтной аппаратуры. Имеет публикации в отечественных и зарубежных изданиях, входящих в базу Scopus. E-mail: chernskutov1989dv@mail.ru

*Черных Илья Викторович*, доктор технических наук, заведующий кафедрой техники высоких напряжений Уральского федерального университета имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина. Основное направление научных исследований – математическое моделирование в электротехнике. Имеет публикации, входящие в отечественные издания, рекомендованные ВАК, а также в зарубежных изданиях, входящих в базу Scopus. E-mail: chernykh@inbox.ru

## ***Design, development and research into the interruption performance of the high voltage gas insulated switch\****

D.V. CHERNOSKUTOV<sup>1</sup>, I.V. CHERNYKH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University, named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira St., Ekaterinburg, 620000, Russian Federation, post-graduate student. E-mail: chernoskutov1989@mail.ru

<sup>2</sup> Ural Federal University, named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19, Mira St., Ekaterinburg, 620000, Russian Federation, D. Sc (Eng.). E-mail: chernykh@inbox.ru

High voltage disconnectors are designed to provide visible breaks during repair and maintenance operations. Classical high voltage air insulated disconnectors are based on arc quenching and insulating in the air. With an increasing demand for compact SF<sub>6</sub>-insulated switchgears in urban and industrial zones this aspect of design and development of hybrid SF<sub>6</sub>-insulated switchgears is becoming increasingly relevant and important. Using these switchgears can considerably reduce both the substation area and costs of construction and arrangement. This paper addresses the development of a compact SF<sub>6</sub> switchgear with a combined disconnecting-earthing switch for the 123 kV voltage class compatible with the SF<sub>6</sub> dead tank circuit breaker VEB-110. Special attention is paid to the switching mode of the 1600A compensating current and arcing time control in compliance with the IEC 62271-102 standard requirement. Special consideration is given to increased breaking performance at high operating bus-transfer voltage value. The paper describes innovative techniques of design in the Unigraphics NX package, numerical simulation in ANSYS, fixing of electrophysical parameters, and current interruption process estimation with subsequent experimental result processing. The paper presents a fundamental investigation of the insulating capability and breaking performance in the main switching modes. The required dielectric level of the contact gap is confirmed. The switching performance of the disconnector is also proved. Arcing time windows during interruptions of different current are found and investigated.

**Keywords:** SF<sub>6</sub> gas-insulated switchgears, bus-transfer current, dielectric level, insulation, electric arc, current zero, burning arc, interruption, erosion, arcing time

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-108-119

### **REFERENCES**

1. L'vov M.Yu., Lunin K.A., Panfilov M.A., Ivashkin A.N., L'vova M.M. Razvitie proizvodstva osnovnogo elektrotekhnicheskogo oborudovaniya v Rossii dlya elektroenergeticheskikh setei napryazheniem 110 kV i vyshе [Development of production of main electrotechnical equipment in Russia for networks 110 kV class and above]. *Energoekspert – Energy Expert*, 2013, no. 5 (40), pp.70–74.
2. Timmerman H., Groeman J.F. Developments towards H.V. substations without disconnector switches and with modern control systems. *IEEE Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear: 400V-145kV for Utilities and Private Networks*, London, 10–12 November 1998, no. 459, pp. 40–45. doi: 10.1049/cp:19980738
3. Burow S., Straumann U., Kihler W., Tenbohlen S. New methods of damping very fast transient overvoltages in gas-insulated switchgear. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, vol. 29, iss. 5, pp. 2332–2339. doi: 10.1109/TPWRD.2014.2328013
4. Lin X., Wang N., Xu J. Arcing model of a disconnector and its effect on VFTO. *Plasma Science and Technology*, 2013, vol. 15, no. 7, pp. 644–647.
5. Shu Y., Han B., Lin J.-M., Chen W., Ban L., Xiang Z., Chen G. Influence of the switching speed of the disconnector on very fast transient overvoltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, vol. 28, iss. 4, pp. 2080–2084. doi: 10.1109/TPWRD.2013.2273620
6. Lalot J., Sabot A., Kieffer J. Dielectric behavior of GIS switching disconnectors comparison of possible phase opposition tests. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1988, vol. 3, iss. 1, pp. 214–222. doi: 10.1109/61.4248
7. Okabe S., Yuasa S., Kaneko S. Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms – analysis and generation circuit of non-standard lightning impulse waveforms in actual field. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electric Insulation*, 2013, vol. 14, iss. 2, pp. 312–320. doi: 10.1109/TDEI.2007.344609

---

\* Received 18 February 2015.

8. Yamagata Y., Tanaka K., Nishivaki S., Takahashi N., Kokumai T., Miwa I., Komukai T., Imai K. Suppression of VFTO in 1100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnecter. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol. 12, iss. 2, pp. 872–880. doi: 10.1109/61.489346
9. Bojic P. Bus transfer current switching in GIS by disconnector application, design criteria and testing. *International Conference on Electric Power Engineering, PowerTech Budapest 99*, Budapest, Hungary, 29 August – 02 September 1999. INSPEC Accession no. 6504213. doi: 10.1109/PTC.1999.826712
10. Smeets R., Linden W.A. van der, Archterkamp M., Damstra G., Meulemeester E.M. de. Disconnector switching in GIS: three-phase testing and phenomena. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, iss. 1, pp. 122–127. doi: 10.1109/61.847239
11. Zhang J.L., Jiu D.Y., Fang M.T.C. Electrode evaporation and its effects on thermal arc behavior. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, vol. 32, iss. 3, pp. 1352–1356. doi: 10.1109/TPS.2004.827606
12. Christophorou L.G., Olthoff J.K., Green D.S. *Gases for electrical insulation and arc interruption: possible present and future alternatives to pure SF<sub>6</sub>*. Technical Note: no. 1428. National Institute of Standards and Technology. Washington, U.S., Government printing office, 1997. 48 p.
13. Poltev A.I. *Konstruksii i raschet elegazovykh apparatov vysokogo napryazheniya* [Design and calculation of high voltage sulfur hexafluoride apparatus]. Leningrad, Lenenergo Publ., 1979. 239 p.
14. Okabe S., Koto M., Endo F., Kobayashi K. Insulation characteristics for very fast transient overvoltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, vol. 11, iss. 1, pp. 210–218. doi: 10.1109/61.484018
15. Lopez-Roldan J., Irwin T., Nurse S. et al. Design, simulation and testing of an EHV Metal enclosed disconnector. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001, vol. 16, iss. 4, pp. 558–563. doi: 10.1109/61.956737
16. GOST 52726–2007. *Raz"edimiteli i zazemliteli peremennogo toka na napryazhenie svyshe 1 kV i privody k nim* [State standard 52726–2007. Alternating current disconnectors and earthing switches for voltage above 1 kV and operating mechanisms for them]. Moscow, Standartinform, 2007. 51 p.
17. International Standard IEC 62271–102. *High-voltage switchgear and controlgear*. Pt. 102: *Alternating current disconnectors and earthing switches*. Ed. 1.1, 2012–02. Geneva, Switzerland, International Electrotechnical Commission, 2012. ISBN 978-2-88912-832-7.
18. Suzuki K., Mizoguchi H., Shimokawara N., Murayama V., Yanabu S. Current interruption by disconnecting switch and earthing switch in GIS. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, 1984, vol. 131, iss. 2, pp. 54–60. doi: 10.1049/ip-c.1984.0008
19. Yanabu S., Nishiwaki S., Mizoguchi H., Shimokawara N., Murayama V. High current interruption, by SF<sub>6</sub> disconnecting switches in GIS. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1982, vol. PAS-101, iss. 5, pp. 1105–1114. doi: 10.1109/TPAS.1982.317372
20. Yanabu S., Ohishi M., Ozaki Y., Murayama Y. Development of UHV gas circuit breaker and disconnecting switch, and their performance tests. *CIGRE Symposium: High Currents in Power Systems Under Normal, Emergency and Fault Conditions*, Brussels, Belgium, June 3–5, 1985, paper no. S06–85, pp. 320-02/1–320-02/6.
21. Yanabu S., Ozaki Y., Oishi M., Murayama Y. New development of 800 kV gas insulated switchgears. *Toshiba review*, 1984, vol. 39–8, pp. 709–712.
22. Toda H., Ozaki Y., Miwa I., Nishivaki S., Murayama V., Yanabu S. Development of 800 kV GIS. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1992, vol. 7, iss. 1, pp. 316–323. doi: 10.1109/61.108924
23. Kapetanovich M. *High voltage circuit breakers*. Sarajevo, Faculty of Electrotechnical Engineering, 2011. 648 p. ISBN 978-9958-629-39-6
24. Edinger A., Mauthe G., Pinnekamp F., Shlicht D., Schmidt W. Disconnector switching of charging currents in metal-enclosed SF<sub>6</sub> gas insulated switchgears at EHV. *CIGRE International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, Paris, 29 August – 6 September 1984, sess. papers no. 13–14.
25. Kieffel Y., Girodet A., Biquez F., Ponchon Ph., Owens J., Costello M., Bulinski M., Van San R., Werner K. SF<sub>6</sub> Alternative development for high voltage switchgears. *CIGRE Session 45*, International Council on large Electric Systems, Paris, 24–29 August 2014, conf. paper no. D1–305.