

УДК 621.31

Ольга Сергеевна Мельникова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-23, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Алина Михайловна Чикалева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-23, e-mail: zebratb@mail.ru

Сергей Викторович Воробьев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-23, e-mail: vsv-ivanovo@yandex.ru

Разработка и исследование имитационной модели мультикамерного разрядника для грозозащитного троса

Авторское резюме

Состояние вопроса. Грозозащитные тросы со встроенным оптическим волокном являются эффективным решением для прокладки магистральных цифровых коммуникаций вдоль высоковольтных линий электропередачи. Это позволяет использовать уже существующую инфраструктуру энергосети и обеспечить передачу большого объема данных. Протекание токов молнии и токов короткого замыкания может вызвать нарушение термической стойкости оптоволокна и ухудшение его производительности. При изолированной подвеске грозозащитных тросов со встроенным оптическим волокном через изолятор, шунтированный искровым промежутком, в процессе эксплуатации возможно изменение расстояния в разрядном промежутке за счет смещения электродов в плоскости, а также при близости места короткого замыкания будут происходить множественные перекрытия и, как следствие, через грозозащитный трос со встроенным оптическим волокном будет протекать ток КЗ. В связи с этим представляется перспективным рассмотрение возможности применения устройства с многоэлектродной системой, построенного по принципу мультикамерного разрядника, в качестве замены искрового промежутка для повышения надежности работы узла с изолированной подвеской грозозащитного троса со встроенным оптическим волокном.

Материалы и методы. Моделирование устройства выполнено в программном комплексе ANSYS Maxwell, математический аппарат которого основан на использовании дифференциальных уравнений Максвелла и методе конечных элементов, позволяющем с достаточно высокой точностью выполнять численное моделирование.

Результаты. Разработана имитационная модель мультикамерного разрядника в программном комплексе ANSYS Maxwell и выполнены расчеты распределения напряжения и напряженности электрического поля. Для системы электродов модели мультикамерного разрядника определено неравномерное распределение приложенного напряжения по искровым разрядным промежуткам камер. Показано, что при воздействии напряжения на разрядник между потенциальным и последующим электродами возникает наибольшая напряженность электрического поля, что при увеличении напряжения приводит к каскадности срабатывания разрядных промежутков, которая обеспечивает требуемые низкие разрядные напряжения срабатывания разрядника в целом.

Выводы. Разработанная упрощенная имитационная модель мультикамерного разрядника показала необходимую для каскадного срабатывания картину распределения напряжения и напряженности электрического поля между различными электродами. На основании проведенных исследований определена конфигурация электродов для разработки физического прототипа и дальнейших исследований мультикамерного разрядника.

Ключевые слова: высоковольтные линии электропередач, мультикамерный разрядник, имитационная модель мультикамерного разрядника, молниезащитные тросы, напряженность электрического поля

Olga Sergeevna Melnikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-23, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Alina Mikhailovna Chikaleva

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-23, e-mail: zebraib@mail.ru

Sergey Viktorovich Vorobyov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-23, e-mail: vsv-ivanovo@yandex.ru

Development and research of a simulation model of a multi-chamber arrester for lightning protection cable

Abstract

Background. Optical fiber overhead ground wire (OPGW) is an effective solution for laying mainline digital communications along high-voltage power lines. It allows you to use the existing infrastructure of the power grid and ensure the transfer of a large amount of data. The flow of lightning currents and short-circuit currents can cause a violation of the thermal resistance of the fiber and a deterioration of its performance. When the OPGW is insulated through an insulator shunted by a spark gap, during operation it is possible to change the distance in the discharge gap due to the displacement of the electrodes in the plane. Also, when the short circuit location is close, multiple overlaps will occur and as a result, short circuit current will flow through the OPGW. Thus, the article considers the possibility to use a device with a multielectrode system developed on the principle of a multichamber spark gap as a replacement of the spark gap to increase the reliability of the unit with an isolated OPGW suspension.

Materials and methods. Modeling of the device has been carried out in the ANSYS Maxwell software package, the mathematical apparatus of which is based on the use of Maxwell's differential equations and the finite element method, which allows performing numerical modeling with sufficiently high accuracy.

Results. A simulation model of a multichamber spark gap has been developed in the ANSYS Maxwell software package and calculations of electrical characteristics have been performed. For the electrode system of a multi-chamber arrester, an uneven distribution of the applied voltage across the spark discharge gaps of the chambers is determined. It is shown that when a voltage is applied to a spark gap, the highest electric field strength occurs between the first and second electrodes, and then a cascade of discharge gaps occurs, which provides the required low discharge voltages of the spark gap as a whole.

Conclusions. The developed simplified simulation model of a multi-chamber arrester has shown all the necessary conditions for cascade imaging of the voltage distribution and the electric-field strength of various electrode options. Based on the research conducted electrodes geometry is identified for smart prototype development and ongoing multi-chamber arrester research.

Key words: High-voltage power lines, multi-chamber arrester, simulation model of a multi-chamber arrester, lightning protection cables, electric field strength

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.049-058

Введение. В настоящее время в Российской Федерации целенаправленно реализуется программа цифровой трансформации топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Эта работа включает в себя целый ряд масштабных проектов – от внедрения информационных технологий (ИТ) удаленного присутствия на объектах энергетики до разработки мобильных сервисов для клиентов. В основе программы лежат сквозные информационные направления, формирующие единое пространство разработки и реализации цифровых технологий в электроэнергетической системе [1].

Конечные цели проводимой цифровой трансформации – повышение надежности, безопасности и эффективности ТЭК России. Программа реализуется с опорой на отечественных производителей оборудования и программного обеспечения (ПО). Это стимулирует их развитие, содействует укреплению технологического суверенитета энергетической отрасли и страны в целом [2, 3].

Необходимость строительства магистральных цифровых коммуникаций для передачи все большего объема данных заставляет использовать для прокладки линий связи существующую инфраструктуру

искровых разрядов от электродов к поверхности изоляционного материала и их выдуванию наружу, в окружающий воздух.

Для корректной работы мультикамерного разрядника должно обеспечиваться каскадное срабатывание его дугогасящих камер, т. е. последовательное перекрытие промежутков между электродами. Это позволяет достичь желаемых низких значений разрядного напряжения для активации мультикамерных разрядников в целом [11].

Исследования [10, 11] показывают эффективность использования мультикамерных разрядников при молниезащите ВЛ, но возможности применения таких систем для изолированной подвески ОКГТ не отражены в полной мере. Исходя из вышесказанного, разработка таких систем является актуальной задачей.

Ниже предлагается имитационная модель подобного мультикамерного разрядника, который может быть использован вместо разрядных рогов (РР) в случае изолированного крепления ОКГТ.

Эффективность мультикамерного разрядника основана на неравномерном распределении напряжения и напряженности электрического поля, которое обеспечивает каскадность его срабатывания. Главной задачей является получение именно такого

распределения напряжения и напряженности электрического поля между электродами разрядника. Это распределение зависит от конфигурации электродов, их количества и расстояния между ними.

Создание и исследование имитационной модели мультикамерного разрядника. На основе анализа практических исследований в области мультикамерных систем [10, 11] была предложена концепция мультикамерного разрядника (рис. 2), для которой выполнялось имитационное моделирование.

Корпус разрядника должен быть выполнен из трекингоэрозионностойкого материала. В качестве электродов в первом приближении используются шары диаметром 12 мм из нержавеющей стали. Для гашения дуги сопровождающего тока предлагается выполнять газоразрядную камеру из газогенерирующего материала (рис. 3). Все размеры модели разрядника соответствуют представленным на рис. 2, 3.

На основе этой концепции была разработана имитационная модель в программном комплексе ANSYS Maxwell с применением решателя Electrostatic, позволяющего произвести анализ электрического поля разрядника, характеризующего состояние разрядника до его срабатывания.

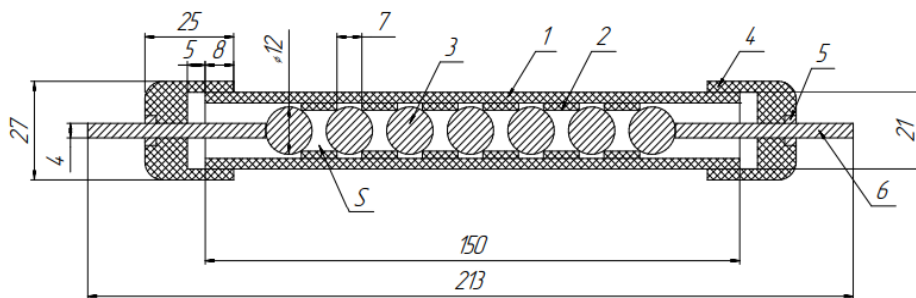


Рис. 2. Базовая модель мультикамерного разрядника: 1 – корпус; 2 – дугогасящая камера из газогенерирующего материала; 3 – электрод; 4 – крышка; 5 – гайка; 6 – контактная клемма

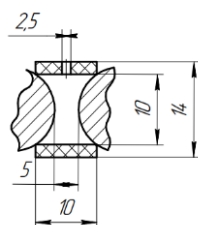


Рис. 3. Дугогасящая камера

Общий вид основных составляющих разрядника (корпус, клеммы, электроды) представлен на рис. 4.

Для решения электростатической задачи предполагается, что все объекты находятся в покое (без движения) и не изменяются со временем. Распределение удельной проводимости в пространстве не имеет значения, важно только распределение диэлектрической проницаемости.

ANSYS Maxwell решает дифференциальное уравнение Пуассона в частных производных для неизвестного электрического потенциала Φ с соответствующими граничными условиями:

$$\nabla(\varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla \Phi) = -\rho_v, \quad (1)$$

где $\Phi(x, y, z)$ – электрический потенциал, который является скалярной функцией положения; $\varepsilon_r(x, y, z)$ – относительная диэлектрическая проницаемость, которая является функцией положения и может быть изотропной или ортотропной; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума (Ф/м); $\rho_v(x, y, z)$ – объемная плотность электрического заряда.

Когда электрический потенциал определен путем решения уравнения (1) второго порядка в области модели, по уравнениям Максвелла и теоретическим формулам вычисляются вектора напряженности электрического поля \vec{E} и электрической индукции \vec{D} следующим образом:

$$\vec{E} = -\nabla \Phi; \quad (2)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \vec{E}. \quad (3)$$

Источниками для данной электростатической задачи в ANSYS Maxwell являются *Voltage* и *Floating*².

Поскольку неравномерность распределения напряжения искрового промежутка в значительной степени зависит от распределения напряжения по емкостям, важно учесть не только собственные емкости разрядника [12]: емкость на землю и емкость на грозозащитный трос были отражены в модели через два дополнительных цилиндра. Поверхность цилиндра, моделирующего емкость на землю, несоизмерима больше по сравнению с моделью разрядника. Цилиндр, моделирующий емкость на грозозащитный трос, имеет несоизмеримо большую длину относительно разрядника. Оба цилиндра выполнены из проводящего материала, а заряд на них задается источником *Voltage*. Имитационная модель, учитывающая емкости на землю и на грозозащитный трос, представлена на рис. 5.

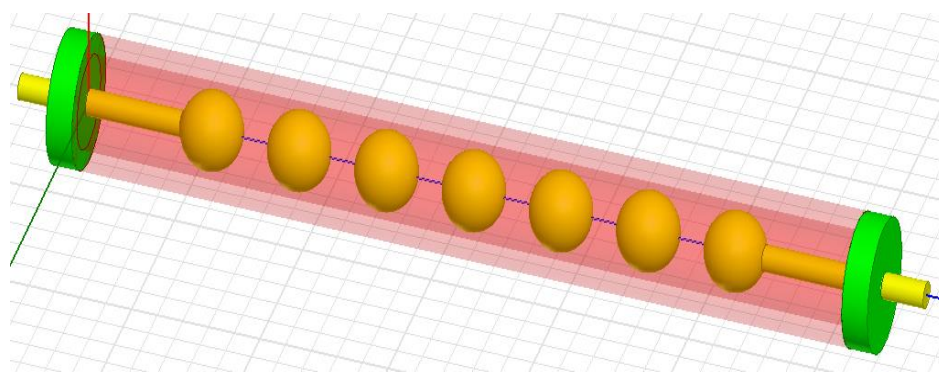


Рис. 4. Модель мультикамерного разрядника в программе ANSYS Maxwell

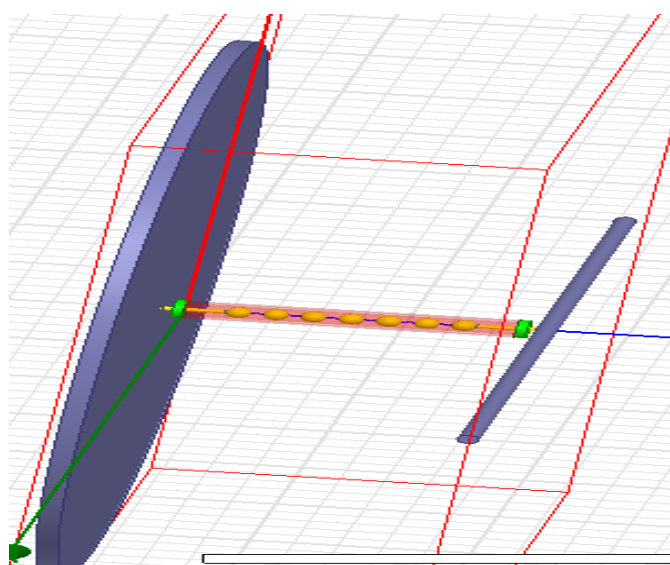


Рис. 5. Модель мультикамерного разрядника с учетом дополнительных емкостей

² Интернет ресурс <https://ansoft-maxwell.ru/maxwell/ElectricFieldCalculation.htm>

Результаты расчетов. Результаты расчета электростатического поля модели мультикамерного разрядника представлены на рис. 6–8.

При воздействии напряжения на разрядник между первым и вторым электродами возникает наибольшая напряженность электрического поля (рис. 8). Дальнейшее увеличение напряжения, соответствующее нарастанию грозового импульса, однозначно вызовет пробой этого искрового промежутка и перенос потенциала с первого электрода на второй. Далее физическая картина пробоя искровых промежутков повторяется [11]. Таким образом, происходит каскадное, т.е. последовательное, перекрытие промежутков между электродами. Благодаря каскадности срабатывания разрядных промежутков обеспечиваются требуемые низкие разрядные напряжения срабатывания мультикамерного разрядника в целом.

Влияние формы электродов, их размера и расстояния между ними оценива-

лось по коэффициенту неоднородности электрического поля.

Коэффициент неоднородности k_H определялся как отношение максимальной напряженности в промежутке к средней [5]

$$k_H = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{сред}}} \quad (4)$$

Средняя напряженность составляет

$$E_{\text{сред}} = \frac{\Delta U}{S}, \quad (5)$$

где ΔU – падение напряжения на электродах; S – расстояние между электродами (для базового варианта составляет 5 мм).

Максимальное значение напряженности поля определялось по графикам, примеры которых приведены на рис. 8–12 для различных вариантов электродных систем (см. таблицу).

С учетом вышеизложенного коэффициент неоднородности поля следует определять в первом межэлектродном промежутке мультикамерного разрядника.

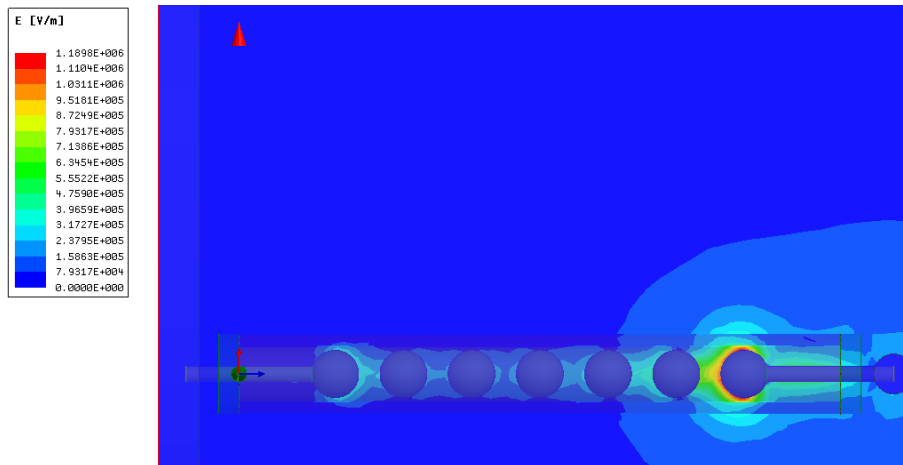


Рис. 6. Распределение напряженности электростатического поля модели МКС

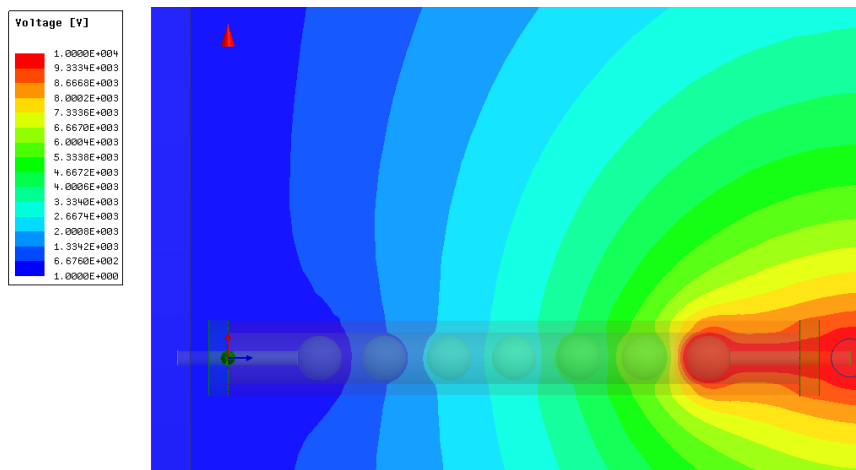


Рис. 7. Распределение потенциала в межэлектродной системе мультикамерного разрядника

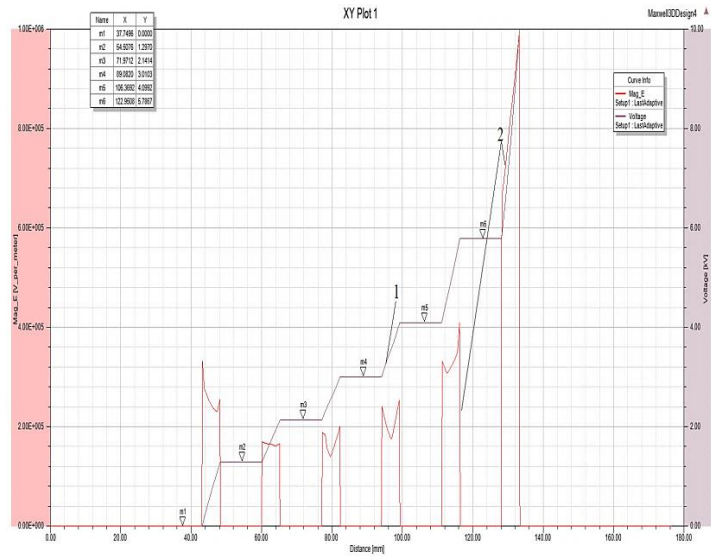


Рис. 8. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) модели МКС для базового варианта

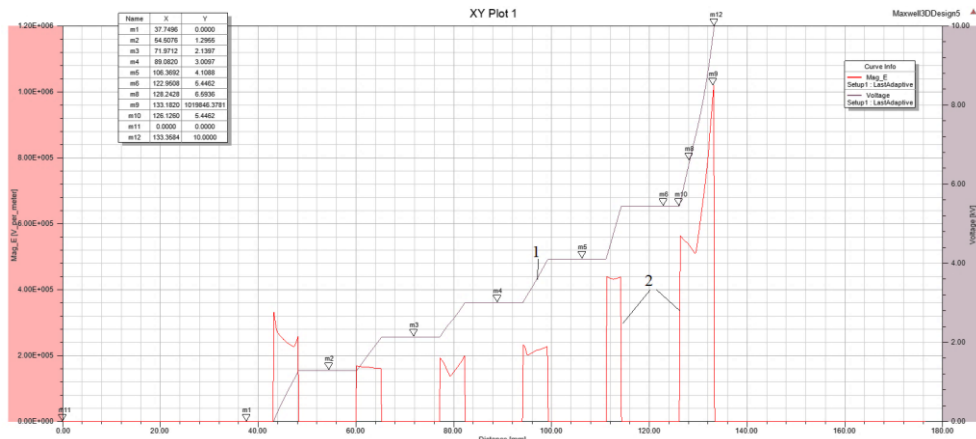


Рис. 9. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) электрического поля модели МКС для варианта 1

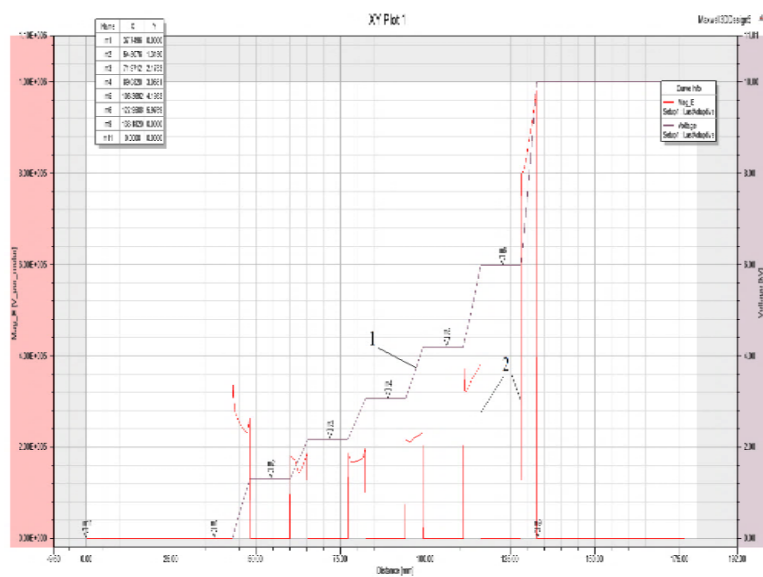


Рис. 10. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) электрического поля модели МКС для варианта 2

Средняя напряженность $E_{\text{сред}}$ в первом межэлектродном промежутке определяется с учетом падения напряжения ΔU , которое рассчитывается по известным потенциалам (рис. 8–12).

$$\Delta U = U_1 - U_2, \quad (6)$$

где U_1 – потенциал первого электрода; U_2 – потенциал второго электрода.

Исследовался диапазон изменения радиуса электродов от 5 до 6,5 мм и расстояния между ними от 5 до 7 мм.

Результаты расчетов коэффициента неоднородности представлены в таблице.

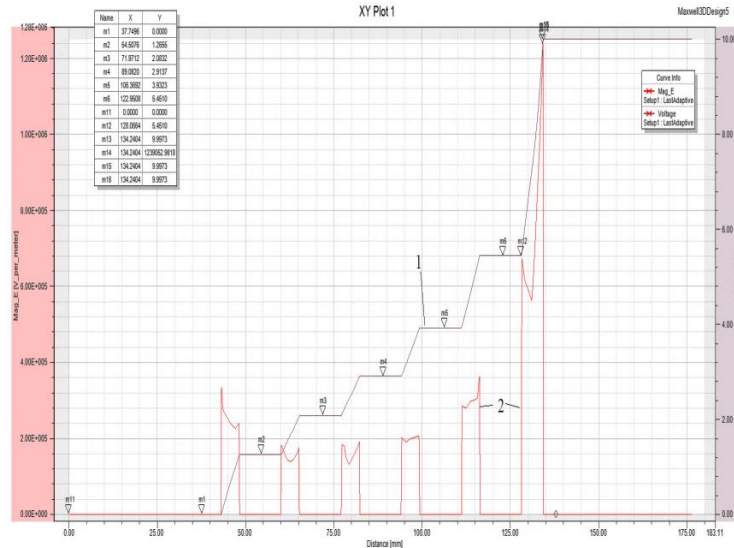


Рис. 11. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) модели МКС для варианта 3

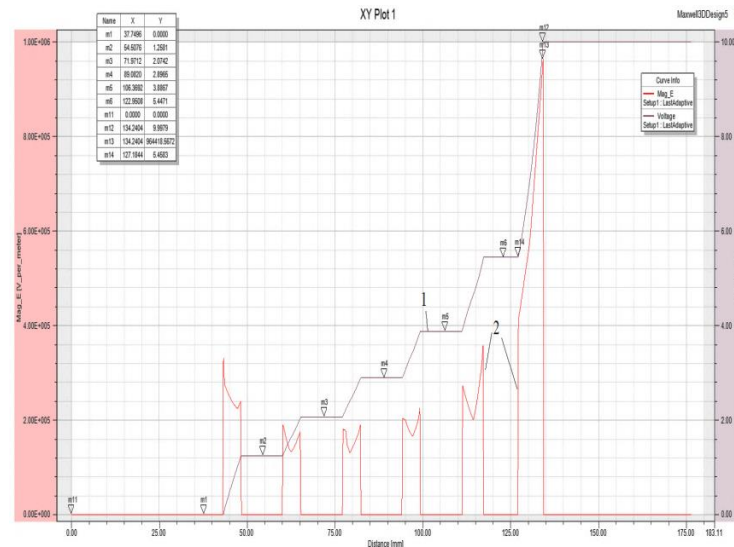


Рис. 12. Графики распределения напряжения (1) и напряженности (2) модели МКС для варианта 4

Расчет коэффициента неоднородности электрического поля

Особенности конфигурации	Коэффициент неоднородности электрического поля					
	$K_{н1-2}$	$K_{н2-3}$	$K_{н3-4}$	$K_{н4-5}$	$K_{н5-6}$	$K_{н6-7}$
Базовый вариант	1,2	1,18	1,17	1,16	1,01	1,28
Увеличение первого межэлектродного промежутка до 7 мм при $r_{эл} = 6$ мм (вариант 1)	1,57	1,65	1,05	1,16	1,06	1,27
Увеличение радиуса первого электрода до 6,5 мм при расстоянии между электродами 5 мм (вариант 2)	1,34	1,06	1,02	1,04	1,04	1,28
Уменьшение радиуса первого электрода до 5 мм при расстоянии между электродами 5 мм (вариант 3)	1,6	1,18	1,06	1,12	1,06	1,31
Уменьшение радиуса первого и второго электродов до 5 мм при расстоянии между электродами 5 мм (вариант 4)	1,5	1,15	1,19	1,14	1,17	1,33

Результаты расчета показывают, что увеличение первого межэлектродного промежутка и уменьшение радиуса первого электрода оказывают определяющее влияние на электрическое поле модели МКС. При таком изменении конфигурации электродов происходит увеличение коэффициента неоднородности более чем на 30 %. Отмечается, что при увеличении первого межэлектродного промежутка наблюдается усиление электрического поля и в последующих промежутках. Влияние изменения радиуса первого электрода на электрическое поле модели МКС незначительно.

Выводы. Анализ результатов расчета распределения напряжения и напряженности электрического поля с использованием разработанной имитационной модели мультикамерного разрядника в программном комплексе ANSYS Maxwell показал: неравномерное распределение приложенного напряжения по искровым разрядным промежуткам для рассматриваемых вариантов электродов МКС; наибольшую напряженность электрического поля в первом искровом промежутке, что является необходимым условием каскадного срабатывания разрядных промежутков для обеспечения требуемых низких разрядных напряжений.

Полученные результаты показывают, что при изменении размера электродов и расстояния между ними для сохранения каскадности срабатывания следует рассматривать вариант с уменьшенным радиусом первого электрода. Тогда в первом межэлектродном промежутке создается достаточная неоднородность поля (коэффициент неоднородности от 1,5 до 2), при этом сохраняется приближенное к однородному поле в остальных межэлектродных промежутках (коэффициент неоднородности менее 1,5). Исследование МКС разрядника необходимо дополнить моделированием электродинамических процессов, происходящих во время разряда, а также определением вольт-секундной характеристики МКС и эффективности газогенерирующих камер.

Список литературы

1. **Актуальные** вопросы цифровой трансформации электросетевого комплекса // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 1(76). – С. 6–16. – EDN PBOPIH.

2. **Хренников А.Ю., Любарский Ю.Я.** Цифровизация в электроэнергетике: эксплуатация и оперативное управление электрическими сетями // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 4(67). – С. 44–50. – EDN VYSUCS.

3. **Energy Sector Enterprises in Digitalization Program: Its Implication for Open Innovation** / Y. Valeeva, M. Kalinina, L. Sargu, et al. // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. – 2022. – Vol. 8, No. 2. – DOI: 10.3390/joitmc8020081. – EDN FCDQLT.

4. **Техника** высоких напряжений: учеб. для вузов / И.М. Богатенков, Ю.Н. Бочаров, Н.И. Гумерова, Г.М. Иманов; под ред. Г.С. Кучинского. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 2003. – 608 с.

5. **Дмитриев М.В., Родчихин С.В.** Расчет термической стойкости грозозащитных тросов ВЛ 110–750 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2017. – № 3(42). – С. 66–69. – EDN ZEPJLF.

6. **Damage Characteristics of OPGWs under Consecutive Lightning Strikes Based on a Coupled Arc-Thermal-Electric Simulation** / Jinru Sun, Shu Li, Qin Qing, et al. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2023, June. – Vol. 38, Issue 3.

7. **Дмитриев М.В., Родчихин С.В.** Грозозащитные тросы ВЛ 35–750 кВ. Выбор мест заземления // Новости ЭлектроТехники. – 2017. – № 2(104). – С. 2–5.

8. **Якушева Ю.С.** Грозозащита и заземление. Молниеотводы, грозозащитные тросы и разрядники // Актуальные проблемы энергетики: материалы 70-й науч.-техн. конф. студ. и асп. / Белорусский национальный технический университет. Энергетический факультет. Секция 2: Электрические системы. – Минск: БНТУ, 2014. – С. 104–105.

9. **Ефремов И.А., Кузьмин А.А.** Роль грозозащитных тросов в процессах короткого замыкания // Доклады ТУСУРа. – 2012, июнь. – № 1(25). – Ч. 1.

10. **Research on Compact Design of Multi-chamber Arc-extinguishing Structure for Lightning Protection** / Shizun Pu, Wenbin Jia, Hongmei Li, et al. // 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). – Beijing, China, 2020.

11. **Overhead Lines Lightning Protection by MultiChamber Arresters and Insulator-Arrester** / G.V. Podporkin, V.E. Pilshikov, E.S. Kalakutsky, A.D. Sivaev // 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). – Shanghai, China, 2014.

12. **Вентильные** разрядники высокого напряжения / Д.В. Шишман, А.И. Бронфман, В.И. Пружинина, В.П. Савельев. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 262 с.

References

1. Aktual'nye voprosy tsifrovoy transformatsii elektrosetevogo kompleksa [Current issues of digital transformation of the electric grid complex]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2023, no. 1(76), pp. 6–16. EDN PBOPJH.
2. Khrennikov, A.Yu., Lyubarskiy, Yu.Ya. Tsifrovizatsiya v elektroenergetike: ekspluatatsiya i operativnoe upravlenie elektricheskimi setyami [Digitalization in the electric power industry: operation and operational management of electric networks]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2021, no. 4(67), pp. 44–50. EDN VYSUCS.
3. Valeeva, Y., Kalinina, M., Sargu, L., Kulachinskaya, A., Ilyashenko, S. Energy Sector Enterprises in Digitalization Program: Its Implication for Open Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 2022, vol. 8, no. 2. DOI: 10.3390/joitmc8020081. EDN FCDQLT.
4. Bogatenkov, I.M., Bocharov, Yu.N., Gumerova, N.I., Imanov, G.M. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [High voltage technique]. Saint-Petersburg: Energoatomizdat, 2003. 608 p.
5. Dmitriev, M.V., Rodchikhin, S.V. Raschet termicheskoy stoykosti grozozashchitnykh trosov VL 110–750 kV [Calculation of thermal resistance of lightning protection cables of 110–750 kV overhead line]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2017, no. 3(42), pp. 66–69. EDN ZEPJLF.
6. Sun, Jinru, Li, Shu, Qing, Qin, Guo, Yongqiang, Yao, Xueling. Damage Characteristics of OPGWs under Consecutive Lightning Strikes Based on a Coupled Arc-Thermal-Electric Simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023, vol. 38, issue 3.
7. Dmitriev, M.V., Rodchikhin, S.V. Grozozashchitnye trosy VL 35–750 kV. Vybor mest zazemleniya [Lightning protection cables of 35–750 kV overhead line. The choice of grounding points]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2017, no. 2(104), pp. 2–5.
8. Yakusheva, Yu.S. Grozozashchita i zazemlenie. Molnieotvody, grozozashchitnye trosy i razryadniki [Lightning protection and grounding. Lightning rods, lightning protection cables and arresters]. *Materialy LXX nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Aktual'nye problemy energetiki»* [Materials of the 70th Scientific and Technical Conference of students and postgraduates “Actual problems of energy”]. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiiy universitet, 2014, pp. 104–105.
9. Efremov, I.A., Kuz'min, A.A. Rol' grozozashchitnykh trosov v protsessakh korotkogo замыкания [The role of lightning protection cables in short circuit processes]. *Doklady TUSURa*, June 2012, no. 1(25), part 1.
10. Pu, Shizun, Jia, Wenbin, Li, Hongmei, Peng, Qingjun, Yang, Ronghua, Yuan, Tao. Research on Compact Design of Multi-chamber Arc-extinguishing Structure for Lightning Protection. 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China, 2020.
11. Podporkin, G.V., Pilshikov, V.E., Kalakutsky, E.S., Sivaev, A.D. Overhead Lines Lightning Protection by MultiChamber Arresters and Insulator-Arrester. 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China, 2014.
12. Shishman, D.V., Bronfman, A.I., Pruzhinina, V.I., Savel'ev, V.P. *Ventil'nye razryadniki vysokogo napryazheniya* [High voltage valve arresters]. Leningrad: Izdatel'stvo «Energiya», 1971. 262 p.