

## Контактные системы вакуумных дугогасительных камер высокого напряжения

БЕЛКИН Г.С., ВЕТЧИНОВ Д.В., РОМОЧКИН Ю.Г.

*Интерес к вакуумным выключателям высокого напряжения связан с рядом их преимуществ перед элегазовыми выключателями. Они идеальны с экологической точки зрения, обладают высоким ресурсом, способны работать при очень низких температурах. Сдерживает широкое применение вакуумных выключателей высокого напряжения более высокая цена по сравнению с элегазовыми выключателями. Основным элементом вакуумного выключателя является вакуумная дугогасительная камера (ВДК), и технические решения, заложенные в ВДК, во многом определяют технико-экономические характеристики выключателя. Проведено математическое и физическое моделирование нескольких вариантов контактных систем для ВДК на номинальное напряжение 110 кВ. По результатам моделирования получено распределение продольной составляющей удельной магнитной индукции. Рассчитан коэффициент неоднородности контактных систем. Измерено электрическое сопротивление индукторов и контактных накладок. Даны рекомендации по выбору контактных систем для высоковольтных ВДК с точки зрения отключающей способности и больших номинальных токов.*

*Ключевые слова:* дугогасительная камера, контактная система, магнитная индукция, коэффициент неоднородности, номинальный ток отключения

В последние годы вакуумные выключатели высокого напряжения (72,5 кВ и выше) заняли прочное место на мировом рынке. Наибольших успехов в развитии вакуумных выключателей высокого напряжения (72,5–170 кВ) достигла японская фирма Japan AE Power Systems Corporation (JAEPSC). Фирмой созданы одноразрывные колонковые выключатели на напряжение 145 кВ и баковые вакуумные выключатели с воздушной изоляцией на напряжение 72,5 и 120 кВ с одним разрывом в полюсе и на напряжение 170 кВ с двумя разрывами в полюсе [1].

В РФ двухразрывный вакуумный выключатель ВБП-110 на номинальное напряжение 110 кВ производит ОАО «НПП «Контакт». В этом выключателе используются вакуумные дугогасительные камеры (ВДК) разработки ФГУП ВЭИ [2].

Интерес к вакуумным выключателям высокого напряжения связан с рядом их преимуществ перед элегазовыми выключателями. Они идеальны с экологической точки зрения, обладают высоким ресурсом, способны работать при очень низких температурах. Сдерживает широкое применение вакуумных выключателей высокого напряжения более высокая цена по сравнению с элегазовыми выключателями.

Основным элементом вакуумного выключателя является ВДК, и технические решения, заложенные в ВДК, во многом определяют технико-экономические характеристики выключателя.

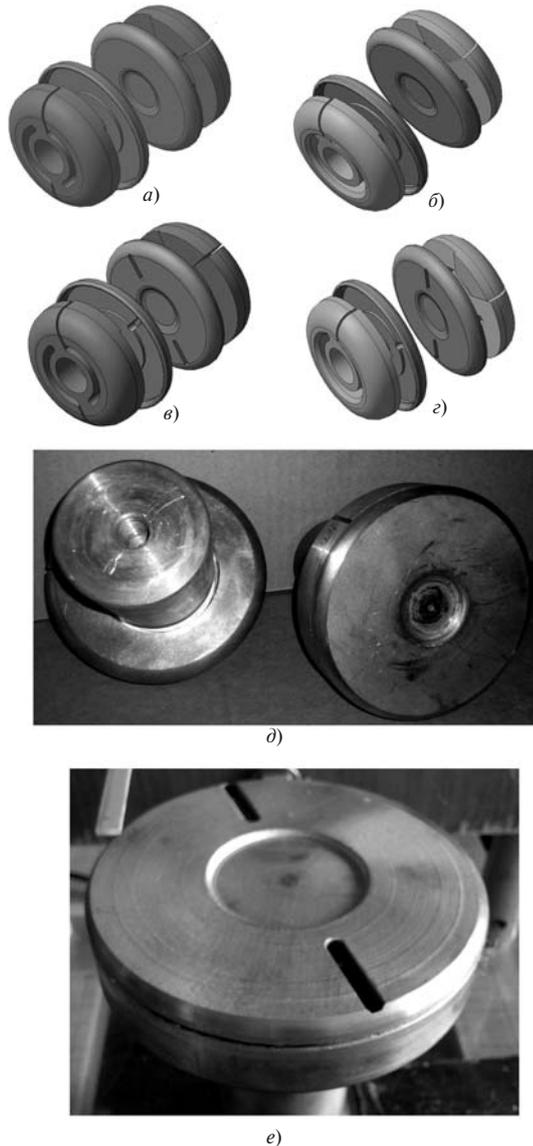
В статье проводится сравнение характеристик некоторых контактных систем с точки зрения возможности их использования в ВДК высокого на-

пряжения. Сравнение проводится применительно к ВДК на номинальное напряжение 110 кВ.

**Постановка задачи и методика исследования.** Особенностью контактных систем для ВДК высокого напряжения (110 кВ и выше) является сочетание высоких требований по электрической прочности межконтактного промежутка с высоким номинальным током отключения (до 40 кА) и большим номинальным током (2500–3150 А). Это означает, что высокая электрическая прочность межконтактного промежутка должна сочетаться с рациональным распределением индукции магнитного поля (обычно продольного) в межконтактном промежутке и небольшим электрическим сопротивлением контактной системы. Продольное магнитное поле обеспечивает диффузную форму дуги отключения с низким напряжением горения. Перечисленные выше требования противоречивы, так как с увеличением межконтактного расстояния обеспечивается достаточно высокая электрическая прочность промежутка, но при этом уменьшается индукция магнитного поля, создаваемого индукторами. Кроме того, решение проблемы увеличения магнитной индукции неизбежно приводит к росту электрического сопротивления индукторов, создающих продольную составляющую магнитного поля в промежутке между разомкнутыми контактами.

Для сравнительного исследования были выбраны следующие конфигурации контактных систем, создающих продольное магнитное поле (рис. 1).

Контактные системы различаются типом индуктора для создания продольного магнитного поля и типом контактной накладки. Из них контактная



**Рис. 1.** Варианты контактных систем для исследования (тип индуктора): *a* – индуктор с двумя полувитками, контактная накладка без прорезей; *б* – с одним витком, контактная накладка без прорезей; *в* – с двумя полувитками, контактная накладка с двумя прорезями; *г* – с одним витком, контактная накладка с двумя прорезями; *д* – с одним витком, контактная накладка без прорезей и со срезанным краем; *е* – с одним витком, контактная накладка с двумя прорезями и со срезанным краем

система рис. 1, *е* может обеспечить максимальную магнитную индукцию, но имеет наибольшее электрическое сопротивление. Контактная система рис. 1, *а* характеризуется наименьшей магнитной индукцией и наименьшим электрическим сопротивлением. Для выбранных контактных систем было проведено математическое моделирование распределения магнитной индукции в межконтактном промежутке с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics. Кроме того, на физической модели контактных систем проведены измерения продольной составляющей индукции магнитного поля с помощью прибора миллитесламетра ТПУ-2У, предназначенного для измерений магнит-

ной индукции постоянных, переменных и импульсных магнитных полей.

По данным математического и физического моделирования определено распределение магнитного поля в промежутке различных контактных систем и проведена оценка их эффективности с точки зрения создаваемого ими продольного поля. Индукция магнитного поля определялась в том диапазоне межконтактных расстояний, при которых проводится дугогашение в ВДК вакуумных выключателей на напряжение 110 кВ. Оценка эффективности той или иной контактной системы с точки зрения дугогашения проводилась с помощью коэффициента неоднородности поля

$$K_H = F_K / F_D,$$

который представляет собой отношение площади рабочей поверхности контактов к площади, занимаемой дугой на этой поверхности [3]. При определении площади, занимаемой дугой, предполагалось, что дуга сосредоточена на тех участках поверхности контактов, для которых в межконтактном промежутке для удельной продольной составляющей индукции выполняется условие:

$$B_{Zy} = \frac{B_Z}{I} \geq (2,5, 3,0) \text{ мТл/кА}, \quad (1)$$

где  $B_Z$  – продольная составляющая магнитной индукции;  $I$  – ток.

При выполнении условия (1) дуга существует при пониженных напряжениях на промежутке. При расчетах определялось изменение удельной индукции по длине промежутка и область, занимаемая дугой, ограничивалась условием (1) во всех точках промежутка внутри этой области.

Условием успешного дугогашения является то, что в момент перехода тока через нуль средняя температура поверхности контактов, на которой горит электрическая дуга, не превышает допустимых значений, т.е. отсутствуют большие участки поверхности контактов, с которых происходит заметное испарение металла после нуля тока [3]. Коэффициент  $K_H$  определяет температурный режим анода в момент перехода тока через нуль при гашении дуги, а следовательно, и эффективность контактной системы с точки зрения дугогашения. Предельный ток отключения (действующее значение) можно вычислить по формуле

$$I = \frac{T_{\text{доп}} F_K (1 \text{ cгw})^{1/2}}{\sqrt{2} K_H (0,7\sqrt{2} + 2 \frac{b}{100}) U_{\phi}}, \quad (2)$$

где  $U_{\phi}$  – эквивалентное прианодное падение напряжения;  $T_{\text{доп}}$  – допустимая температура поверхности анода при переходе тока через нуль;  $l$  – коэффициент теплопроводности контактного мате-

риала;  $c$  – удельная теплоёмкость;  $\rho$  – плотность;  $\omega$  – круговая частота тока;  $b$  – процентное отношение аperiodической составляющей.

Для ВДК на напряжение 110 кВ дугогашение заканчивается при межконтактных промежутках длиной до 20–35 мм, поэтому распределение индукции  $B_Z$  изучалось при изменении длины промежутка в этих пределах.

Параллельно с изучением распределения магнитной индукции определялось электрическое сопротивление индукторов и контактных накладок контактных систем, изображенных на рис. 1, и проводилось сравнение их эффективности как с точки зрения дугогашения, так и с точки зрения способности пропускать большие номинальные токи.

**Результаты исследования.** На рис. 2 представлены для различных контактных систем распределения продольной составляющей удельной индукции  $B_{Zy}$  по результатам математического моделирования, а на рис. 3 – по результатам измерений на физических моделях.

Распределения продольной составляющей удельной индукции  $B_{Zy}$ , полученные различными методами, достаточно хорошо согласуются. На рис. 2 и 3 показаны распределения магнитной индукции при межконтактном промежутке 20 мм. Измерения магнитной индукции на физических моделях контактных систем проводились в середине межконтактного промежутка в различных точках от центра по радиусу.

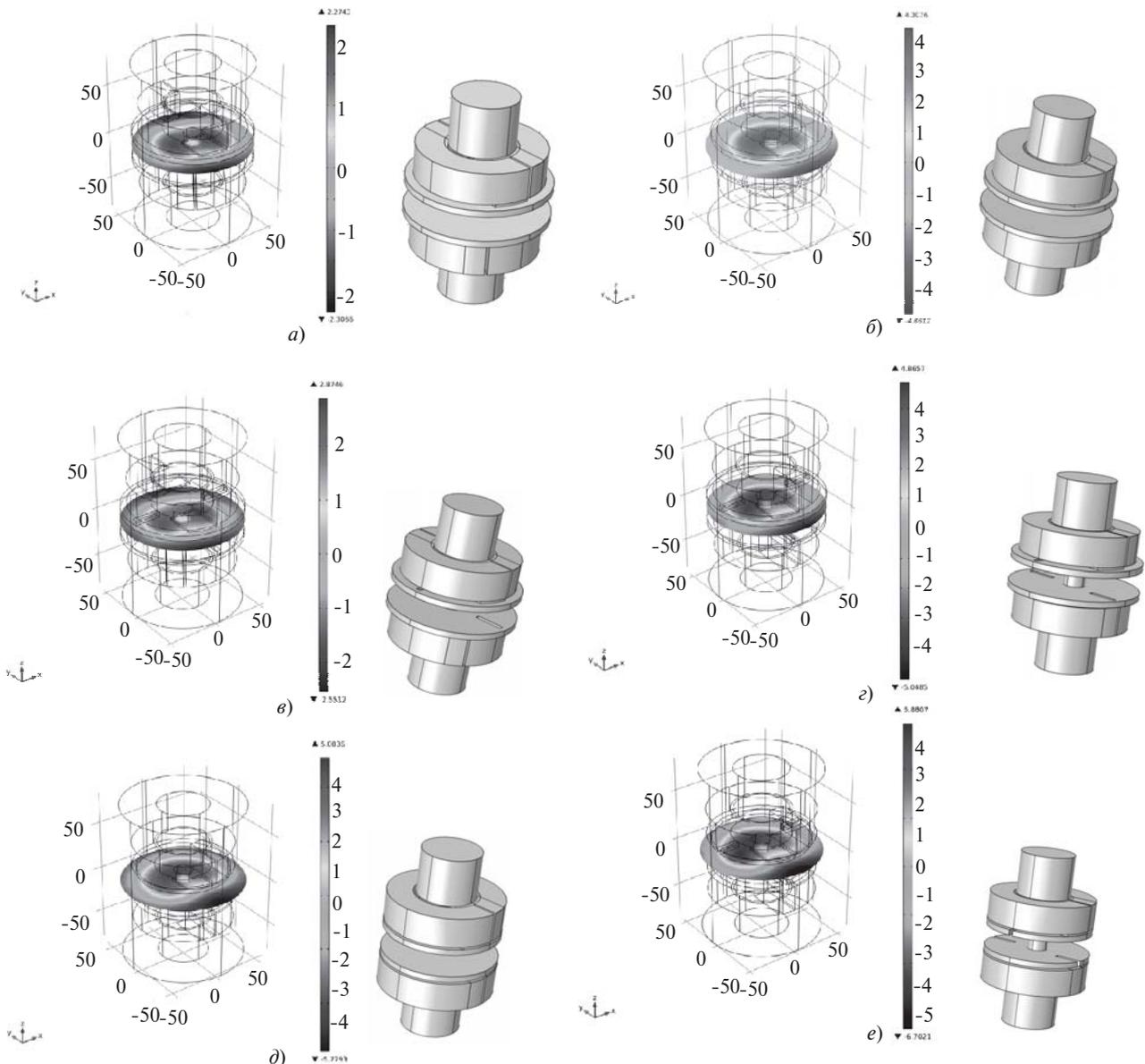


Рис. 2. Распределение продольной составляющей удельной индукции в контактных системах по результатам математического моделирования: а–е – см. рис. 1

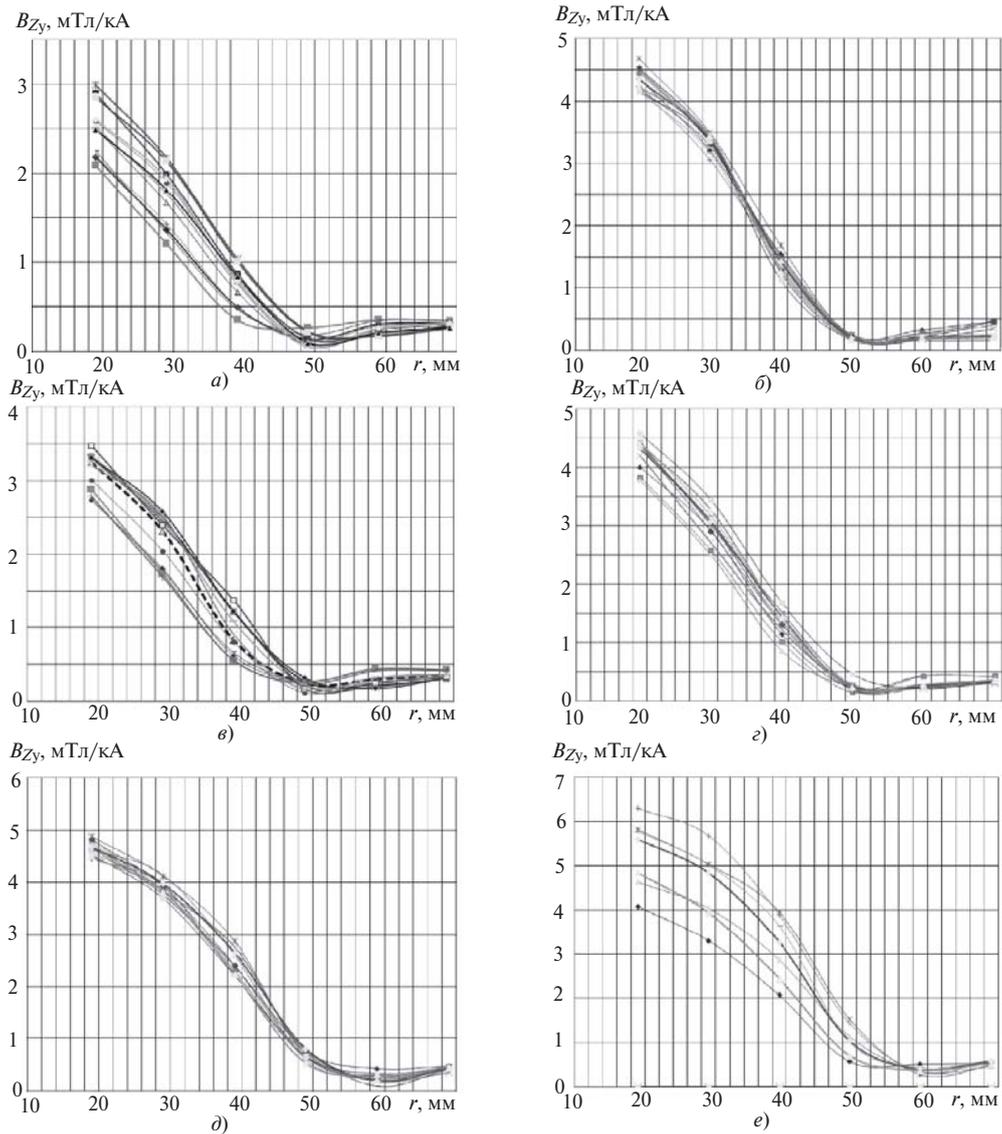


Рис. 3. Результаты измерения магнитной индукции на физических моделях контактных систем: а–е – см. рис. 1

Для ВДК высокого напряжения наличие прорезей в контактной накладке может отрицательно

влиять на электрическую прочность промежутка. Поэтому был изучен вопрос, насколько изменится

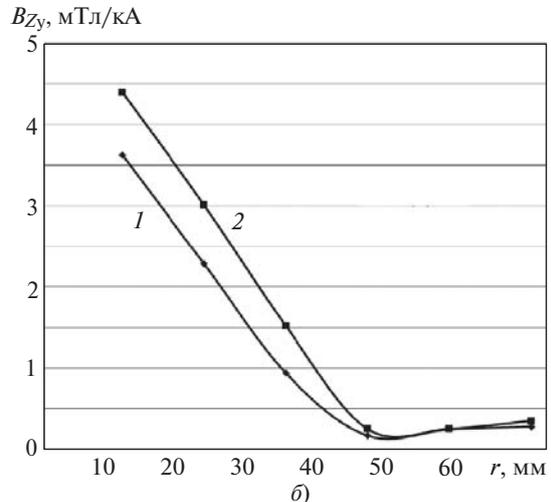
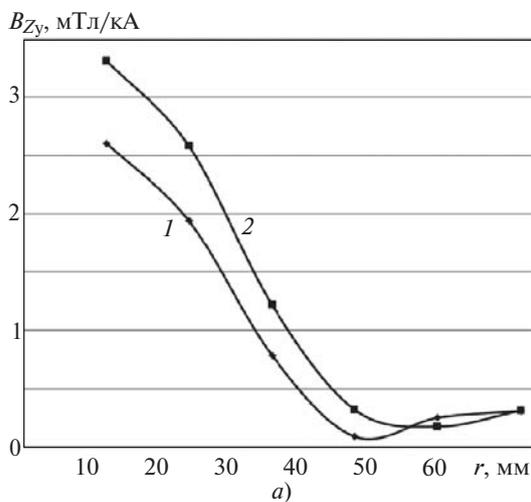


Рис. 4. Сравнение результатов распределения магнитной индукции при наличии и отсутствии пазов в контактной накладке: а – индуктор с двумя полувитками; б – с одним витком: 1 – без прорезей; 2 – с прорезями

Номер п/п	Тип контактной системы (тип индуктора)	Электрическое сопротивление контактной системы, мкОм (индуктор + контактная накладка)	Расстояние между контактами, мм	Коэффициент неоднородности $K_H$	Предельный ток отключения, I, кА
1	С двумя полувитками, контактная накладка без прорезей	5	20 30	3,34 4,49	21,3 15,9
2	С одним витком, контактная накладка без прорезей	10	20 30	2,16 2,84	34 25
3	С двумя полувитками, контактная накладка с двумя прорезями	7	20 30	2,74 3,85	26 18,5
4	С одним витком, контактная накладка с двумя прорезями	12	20 30	1,94 2,58	36,8 27,6
5	С одним витком, контактная накладка без прорезей и со срезанным краем	9	20 30	1,46 1,65	41,2 36,7
6	С одним витком, контактная накладка с двумя прорезями и со срезанным краем	13	20 30	1,3 1,5	46,9 40,6

магнитная индукция из-за влияния вихревых токов. Как видно из сравнения распределений продольной составляющей удельной магнитной индукции при зазоре между контактами 20 мм (рис. 4), наличие в контактной накладке двух прорезей позволяет увеличить отключающую способность ВДК на 15–20%.

Таким образом наличие пазов в контактной накладке позволяет снизить негативное влияние вихревых токов. Увеличивается площадь поверхности контактов, где справедливо условие (1), и электрическая дуга может существовать в диффузной форме.

Результаты оценки коэффициента неоднородности и электрического сопротивления различных контактных систем приведены в таблице. Кроме того, в таблице показаны расчетные значения предельного тока отключения контактных систем при диаметре 110 мм. При расчетах с помощью выражения (2) были выбраны следующие параметры дугогашения:  $U_{\phi} = 20$  В,  $T_{\text{доп}} = 1300$  К,  $b = 50\%$ .

Наибольшую эффективность при дугогашении показала контактная система № 6. Это означает, что при отключении больших токов требуемый диаметр этой контактной системы будет наименьшим.

С точки зрения пропускания больших номинальных токов преимущество имеет контактная система № 1. Эта контактная система обладает наименьшим электрическим сопротивлением. В

вакуумных выключателях на напряжение 110 кВ с номинальным током 3150 А желательно, чтобы сопротивление ВДК не превышало 25–30 мкОм. С контактными системами № 2, № 3 и № 5 могут быть достигнуты такие значения сопротивления ВДК. При этом контактная система № 5 должна быть эффективна при номинальном токе отключения ВДК до 40 кА.

**Заключение.** Для пропускания больших номинальных токов наиболее подходит контактная система с индуктором с двумя полувитками: она обладает наименьшим электрическим сопротивлением. В ВДК с номинальным током отключения 40 кА предпочтительнее использование индуктора с одним витком либо использование контактной накладки с прорезями для снижения влияния вихревых токов. Наличие прорезей в контактной накладке позволяет увеличить эффективность дугогашения на 15–20%. Однако прорези могут отрицательно влиять на электрическую прочность высоковольтных ВДК.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matsui Y., Nagataka K., Takeshita M., Katsumata K., Sano A., Ichikawa H., Sakaki M. Development and technology of high voltage VCBs; brief history and state of art. – Proc. of XXII Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006.
2. Белкин Г.С., Ромочкин Ю.Г. Создание вакуумной коммутационной аппаратуры на напряжение 72,5–220 кВ: состояние и перспективы. – Электричество, 2011, № 9, с. 28–30.

3. **Белкин Г.С.** Коммутационные процессы в электрических аппаратах. – М.: Знак, 2003.

[17.11.14]

*Авторы: Белкин Герман Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1962 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию по специальности «Электрические аппараты» во Всероссийском электротехническом институте (ВЭИ). Начальник отдела ФГУП ВЭИ.*

*Ветчинов Дмитрий Вячеславович окончил Институт электротехники МЭИ в 2011 г. Инженер отдела вакуумной коммутационной аппаратуры ФГУП ВЭИ.*

*Ромочкин Юрий Геннадьевич окончил энергомашиностроительный факультет МВТУ им. Баумана в 1979 г. В 1983 г. защитил кандидатскую диссертацию по вакуумной технике. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 5, pp. 30–35.*

## Contact Systems of High-Voltage Vacuum Arc Chutes

G.S. BELKIN, D.V. VETCHINOV, and Yu.G. ROMOCHKIN

*The interest to high-voltage vacuum circuit breakers is stemming from their having a number of advantages with respect to SF6 circuit breakers. These apparatuses are the ideal ones from the environmental point of view, they have high service life indicators and can operate at very low temperatures. Unfortunately, wide-scale use of high-voltage vacuum circuit breakers is restrained due to their being more expensive than SF6 circuit breakers. A vacuum arc chute (VAC) is the main component of a vacuum circuit breaker, and the technical solutions laid down in the VAC in many respects determine the circuit breaker's technical and economic characteristics. Mathematical and physical modeling of a few versions of the contact systems for the VAC for the 110 kV rated voltage is carried out. The distribution of the specific magnetic induction's longitudinal component is obtained based on the simulation results. The contact system nonuniformity factor is calculated. The electrical resistance of inductors and contact covers is measured. Recommendations on selecting the contact systems for high-voltage VACs are given from the viewpoint of their breaking capacity and large nominal currents.*

*Key words: arc chute, contact system, magnetic induction, nonuniformity factor, rated breaking current*

### REFERENCES

1. **Matsui Y., Nagataka K., Takeshita M., Katsumata K., Sano A., Ichikawa H., Sakaki M.** Development and technology of high voltage VCBs; brief history and state of art. – Proc. of XXII Int. Symp. On Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Matsue, 2006.

2. **Belkin G.S., Romochkin Yu.G.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 9, pp. 28–30.

3. **Belkin G.S.** *Kommutatsyonnye protsessy v elektricheskikh apparatakh* (Commutation processes in electrical apparatuses). Moscow, Publ. Znak, 2003, p.

*Authors: Belkin German Sergeevich (Moscow, Russia) – Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department, All-Russia Institute of Electrical Engineering (ARIEE).*

*Vetchinov Dmitrii Vyacheslavovich (Moscow, Russia) – Engineer in the Department, ARIEE.*

*Romochkin Yurii Gennad'yevich (Moscow, Russia) – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Sector, ARIEE.*

