

Improving the Efficiency of Direct Current Contactors Operation through the Use of an Arc Extinguishing Chamber with Permanent Magnets

Kirillov I.V., Dergachev P.A.
National Research University «MPEI»
Moscow, Russian Federation

Abstract. The objectives of this study are to prove the operability and efficiency of an arc extinguishing chamber equipped with neodymium permanent magnets of grade N35 specifically for application in direct current circuits of railway locomotives, and to confirm that a direct current breaking arc can be extinguished solely by a non-uniform magnetic field created by these magnets. To achieve this goal, a series of calculations based on a computer model of the full breaking arc extinction process in the aforementioned chamber was carried out for currents ranging from 88 A to 0.4 kA. Several important tasks were solved during this research, and we also focused on the analysis of existing DC contactors and their arc systems, the structural design of the chamber, increasing the extinction speed, and ensuring bidirectional commutation, which is critical for traction motors operating in regenerative braking mode. The key results obtained during the simulation are successful extinction solely by the non-uniform field of the N35 magnets, an extinction time of ~5 ms at 0.4 kA, and proven operability during changes in current direction. The practical significance of this work lies in applying the chamber in railway DC contactors to optimize the overall layout of electrical apparatus and power supply systems, reduce the associated technological requirements for switching equipment production, enhance reliability and operational safety due to higher speed, and scale the proposed solution for a series of DC contactors for both power and auxiliary circuits.

Keywords: magnetic blow-out, breaking electric arc, permanent magnets, railway contactors.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2026.3-71.05>

UDC: 621.316.53.064.241

Îmbunătățirea eficienței funcționării contactoarelor de curent continuu prin utilizarea unei camere de stingere a arcului cu magneți permanenți

Kirillov I.V., Dergachev P.A.

Universitatea Națională de Cercetare «MEI», Moscova, Federația Rusă

Rezumat. Obiectivele acestui studiu sunt demonstrarea operabilității și eficienței unei camere de stingere a arcului, echipate cu magneți permanenți din neodim, de gradul N35, special destinată aplicațiilor în circuitele de curent continuu ale locomotivelor feroviare, precum și confirmarea faptului că un arc electric de rupere în curent continuu poate fi stins exclusiv prin intermediul unui câmp magnetic neuniform creat de acești magneți. Pentru atingerea acestui obiectiv, s-a efectuat o serie de calcule bazate pe un model computerizat al procesului complet de stingere a arcului electric de rupere în camera menționată anterior, pentru curenți cuprinși între 88 A și 0.4 kA. În cadrul acestei cercetări au fost rezolvate mai multe sarcini importante, concentrându-ne, de asemenea, asupra analizei contactoarelor de curent continuu existente și a sistemelor lor de stingere a arcului, asupra proiectării structurale a camerei, asupra creșterii vitezei de stingere și asupra asigurării comutației bidirecționale, esențială pentru motoarele de tracțiune care funcționează în regim de frânare regenerativă. Rezultatele-cheie obținute în timpul simulării constau în stingerea cu succes a arcului electric exclusiv prin câmpul magnetic neuniform generat de magneții N35, obținerea unui timp de stingere de aproximativ 5 ms la un curent de 0.4 kA și demonstrarea operabilității în timpul schimbării direcției curentului. Semnificația practică a acestei lucrări constă în aplicarea camerei de stingere în contactoarele de curent continuu utilizate în domeniul feroviar, în vederea optimizării configurației generale a aparatelor electrice și a sistemelor de alimentare cu energie electrică, a reducerii cerințelor tehnologice asociate producerii echipamentelor de comutare, a sporirii fiabilității și siguranței în exploatare datorită vitezei mai mari de stingere și a extinderii soluției propuse la o gamă de contactoare de curent continuu, atât pentru circuitele de putere, cât și pentru cele auxiliare.

Cuvinte-cheie: suflare magnetică, rupere arcului electric, magneți permanenți, contactoare feroviare.

Повышение эффективности работы контакторов постоянного тока за счёт применения дугогасительной камеры с постоянными магнитами

Кириллов И. В., Дергачев П. А.

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Основными целями настоящего исследования являются: доказательство работоспособности и эффективности дугогасительной камеры с неодимовыми постоянными магнитами в контексте её применения в цепях постоянного тока железнодорожных локомотивов и подтверждение тезиса о том, что электрическая дуга отключения постоянного тока может быть погашена исключительно посредством неоднородного магнитного поля постоянных магнитов. Для достижения поставленной цели была проведена серия расчётов компьютерной модели процесса гашения электрической дуги отключения в упомянутой дугогасительной камере при токах от 88 А до 0.4 кА; были решены задачи анализа существующих контакторов постоянного тока и их систем дугогашения, конструирования исследуемой дугогасительной камеры, увеличения скорости гашения электрической дуги отключения постоянного тока, а также задача двунаправленной коммутации постоянного тока, которая необходима для работы тяговых электродвигателей электровозов в режиме рекуперации. Наиболее важными результатами являются: гашение электрической дуги отключения исключительно посредством неоднородного магнитного поля неодимовых постоянных магнитов марки N35, время гашения электрической дуги отключения (~5 мс при токе 0.4 кА), а также возможность работы исследуемой дугогасительной камеры при изменении направления тока коммутации (при двунаправленной коммутации). Значимость полученных результатов состоит в применении исследуемой дугогасительной камеры в контакторах постоянного тока, которые применяются в цепях железнодорожных локомотивов, что может позволить оптимизировать компоновку электрических аппаратов и систем электроснабжения электровозов постоянного тока в целом, снизить технологические требования к производству коммутационной аппаратуры железнодорожного транспорта, повысить надёжность и безопасность эксплуатации железнодорожных локомотивов в силу увеличения быстродействия электрических аппаратов, а также масштабирование предложенного технического решения в рамках создания линейки контакторов постоянного тока для силовых и вспомогательных цепей железнодорожных локомотивов постоянного тока.

Ключевые слова: магнитное дутьё, электрическая дуга отключения, постоянные магниты, контакторы железнодорожных локомотивов.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня постоянный ток продолжает иметь ключевое значение для железнодорожного транспорта. А именно для электровозов постоянного тока. Для работы подвижного состава необходимы коммутационные аппараты, надёжность коммутации которых определяется не только номинальными параметрами системы электроснабжения, но и способностью быстро гасить электрическую дугу отключения (ЭДО).

В контексте цепей тяговых электродвигателей (ТЭД) эта задача усложняется ввиду переключения ТЭД в режим рекуперативного торможения, что приводит к изменению направления тока.

В применяемых контакторах постоянного тока доминируют две конструктивные группы дугогасительных устройств: камеры с дугогасительными решётками и щелевые, в том числе лабиринтные, дугогасительные камеры.

Причём дугогасительные решётки известны с 1912 года, а щелевые дугогасительные камеры применяются в

составе железнодорожных локомотивов с 1922 года [1,2].

Тем не менее, эти устройства хорошо себя зарекомендовали и успешно применяются до сих пор.

Примеры щелевой лабиринтной дугогасительной камеры и дугогасительной решётки, которые применяются в контакторах железнодорожного исполнения, можно видеть на рисунке 1.



Рис. 1. Щелевая дугогасительная камера (слева) и дугогасительная решётка (справа).

Fig. 1. Arc chute with slot-type design (left) and arc quenching grid (right).

В обоих случаях для перемещения ЭДО в дугогасительный объём используется магнитное дутьё, создаваемое постоянными магнитами, дугогасительными катушками или электромагнитами. Такие решения технологически отработаны и применяются в аппаратах Schaltbau, Sécheron, Microelettrica и

Hubbell. В промышленных каталогах этих производителей коммутационной аппаратуры упоминаются дугогасительные камеры с постоянными магнитами, электромагнитное дутье, неполяризованные и поляризованные дугогасительные камеры [3-9].

Публикации последних лет подтверждают, что магнитное дутьё существенно влияет на состояние контактов, повторные зажигания, форму ЭДО, и параметры дугогасительной камеры [10-19]. При этом большинство работ и промышленных решений рассматривают магнитное дутьё как частичную меру более сложной системы, состоящей из: дугогасительной решетки, щелевой дугогасительной камеры, электромагнитной катушки, импульсного внешнего поля или поляризованной дугогасительной камеры. Отсюда следует, что, вопрос использования для гашения ЭДО постоянного тока дугогасительной камеры, которая гасит ЭДО посредством лишь постоянных магнитов недостаточно проработан. Как и вопрос гашения ЭДО при воздействии на ЭДО постоянного неоднородного магнитного поля в течение всей коммутации и во всём объёме дугогашения.

Научная гипотеза настоящей работы состоит в том, что если магнитное дутьё действует на канал ЭДО на протяжении всего процесса коммутации, то время гашения может быть уменьшено по сравнению с решениями, где значительная часть процесса гашения ЭДО связана с последующим её охлаждением и сопутствующими ему процессами. Цель исследования - оценить работоспособность дугогасительной камеры с неодимовыми постоянными магнитами при отключении постоянного тока и определить характер изменения времени гашения в диапазоне токов, достижимом на имеющейся в распоряжении опытной установке.

Научная новизна работы заключается в трех положениях.

В-первых, рассматривается дугогасительная камера, в которой механизм гашения ЭДО основан только на непрерывном растягивании ЭДО постоянными магнитами. Во-вторых, конструкция ориентирована на прямое и обратное направления тока без использования дугогасительной катушки или катушке. В-третьих, получена расчетная оценка времени гашения и геометрии канала ЭДО в диапазоне токов до 0.4 кА.

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является дугогасительная камера, представляющая собой пластиковый каркас с установленными внахлест призматическими неодимовыми магнитами из материала N35. Данная дугогасительная камера изображена на рисунке 2. При этом проработано два исполнения. Для однонаправленной и для двунаправленной коммутации.

Для однонаправленного исполнения предусмотрены магниты размером 10x10x40 мм, для двунаправленного исполнения - 10x10x20 мм. Постоянные магниты с упомянутой геометрией позволяют сохранить общий габарит дугогасительной камеры как для однонаправленного, так и для двунаправленного исполнения.

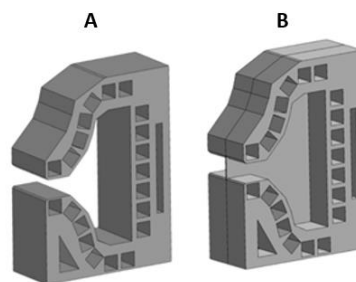


Рис. 2. Дугогасительная камера с постоянными магнитами в однонаправленном исполнении (А) и в двунаправленном исполнении (В).

Fig. 2. Arc quenching chamber with permanent magnets, unidirectional (A) and bidirectional (B) versions.

Принцип работы исследуемой дугогасительной камеры основан на взаимодействии тока ЭДО с внешним неоднородным постоянным магнитным полем. Вследствие взаимодействия собственного магнитного поля ЭДО и внешнего поля постоянных магнитов возникает сила Лоренца, результирующий вектор которой направляет канал ЭДО внутрь дугогасительного объема. Причём действие этой силы сохраняется на всех стадиях горения ЭДО. В отличие от щелевой камеры или камеры с дугогасительной решеткой, исследуемая конструкция не подразумевает механического воздействия или взаимодействия между каналом ЭДО и составными её частями. Механизм работы устройства, о котором идёт речь, основан только на растяжении канала ЭДО,

увеличении его поверхности теплоотдачи и последующим нарушением энергетического баланса ЭДО в течение всего процесса коммутации.

Расчетная модель гашения ЭДО в рассматриваемой дугогасительной камере состояла из электростатического, электромагнитного, гидрогазодинамического и теплового блоков. Мультифизическая связь между ними задавалась при помощи блока магнитогидродинамики, который описывал движение нагретой проводящей среды в поле постоянных магнитов. Для описания турбулентной природы процесса дугогашения была использована модель Спаларта-Аллмараса.

Электромагнитная часть модели опиралась на квазистационарное описание полей и токов в расчетной области [20].

Методическая база моделирования ЭДО в части магнитогидродинамики опиралась на подходы, применяемые в современных исследованиях, а тепловой и газодинамический блоки учитывали теплопроводность, конвекцию и излучение в рамках исследуемого процесса [21-24].

Математическая основа модели задана следующими уравнениями, которые определяют электрические, магнитные, газодинамические и тепловые связи процесса гашения ЭДО.

Основные законы электростатического блока представлены выражениями (1) и (2) [22].

$$J_c = \sigma E \quad (1)$$

Где: J_c – плотность тока, A/m^2 ; σ – удельная электрическая проводимость, Cm/m ; E – напряженность электрического поля, V/m .

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E, \quad (2)$$

где: D – вектор диэлектрического смещения, $Kл/m^2$; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, F/m ; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; E – напряженность электрического поля, V/m .

Электромагнитная часть модели задана выражениями (3) и (4) [22].

$$\nabla \times H = J \quad (3)$$

Где: H – напряженность магнитного поля, а $\nabla \times H$ его ротор, A/m ; J – полная плотность тока, A/m^2 .

$$B = \nabla \times (A_b - A_r) \quad (4)$$

Где: B – вектор магнитной индукции, $Tл$; A_b – фоновый векторный потенциал, $Вб/м$; A_r – редуцированный векторный потенциал, $Вб/м$.

Гидрогазодинамическая часть расчёта была выполнена посредством использования модели Спаларта-Аллмараса (англ. Spalart-Allmaras), которая опирается на выражения 5 и 6 [23, 24].

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad (5)$$

Где: ρ – плотность газа, $кг/м^3$; u – скорость потока, $м/с$; ∇ – градиент скорости потока; P – давление, $Па$; I – единичный тензор; K – тензор вязких напряжений; F – сумма объёмных сил (тяжести, Лоренца), $Н/м^3$.

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(\mu + \mu_t \sigma_k) \nabla k] + P - \beta_0 \rho \omega k \quad (6)$$

Где: ρ – плотность газа, $кг/м^3$; u – скорость потока, $м/с$; k – кинетическая энергия турбулентности, $м^2/с^2$; ∇ – градиент скорости потока; μ – вязкость молекулярная, $Па \cdot с$; μ_t – вязкость турбулентная, $м^2$; σ_k – число Прандтля для турбулентного потока; P – скорость продукции турбулентности, $м^2/с^3$; β_0 – константа модели $k-\omega$; ω – удельная диссипация турбулентности, $1/с$.

Наконец, для описания тепловой природы коммутации использовались уравнения (7)-(10) [25].

$$d_z \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = d_z Q + q_0 + d_z Q_d \quad (7)$$

Где: d_z – тензор анизотропии теплопереноса; ρ – плотность среды, $кг/м^3$;

c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, Дж/кг·К; u – скорость течения газа, м/с; ∇T – градиент температуры, К/м; q – плотность теплового потока, Вт/м²; Q – объёмный источник теплоты, Вт/м³; q_0 – тепловой поток от поверхности, Вт/м²; Q_d – энергия тепловой диссипации, Дж.

$$q = -d_z k \nabla T \quad (8)$$

Где: q – плотность теплового потока, Вт/м²; d_z – тензор анизотропии теплопереноса; k – кинетическая энергия турбулентности, м²/с²; ∇T – градиент температуры, К/м.

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (9)$$

Где: q_0 – тепловой поток, Вт/м²; T_{ext} – температура среды, К; T – температура в расчётной точке, К.

$$q_0 = \varepsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4) \quad (10)$$

Где: q_0 – полный тепловой поток на границе, Вт/м²; ε – степень черноты границы; T_{amb} – температура среды, К; T – температура на границе, К.

На основе упомянутых выражений строилась вся модель процесса гашения ЭДО в исследуемой дугогасительной камере. В том числе распределение магнитной индукции, температурное поле, траектория и длина канала ЭДО, а также время его разваливания.

Такой набор выходных величин напрямую связан с проверяемой гипотезой: если поле постоянных магнитов остается действующим фактором на всех стадиях, расчет должен показывать направленное вглубь исследуемой дугогасительной камеры растяжение канала и сравнительно меньшее время гашения ЭДО.

Расчетная область моделирования включала в себя воздушный объем дугогасительной камеры, контактную зону и области постоянных магнитов. В качестве контролируемых выходных величин использовались распределение магнитной

индукции, температурное поле, форма канала ЭДО, его длина и время гашения ЭДО.

Моделирование гашения ЭДО проводилось при постоянном напряжении 110 В и четырех значениях тока коммутации: 88 А, 146 А, 171 А и 0.4 кА. Последнее значение электрического тока соответствует наибольшему возможному току опытной установки, предназначенной для последующей экспериментальной верификации результатов моделирования.

В таблице 1 приведены входные данные и ожидаемые результаты моделирования.

Таблица 1 (Table 1).

Параметры модели. The model parameters.

Параметр	Значение параметра
Напряжение цепи	110 В
Токи коммутации	88, 146, 171 и 0.4 кА
Средство гашения	Постоянные магниты
Габариты постоянных магнитов	10x10x40 мм
Расчётная область	Объем камеры, зона контактов и постоянных магнитов
Расчётные блоки	Электростатика, электромагнетизм, гидрогазодинамика, теплоперенос; мультифизические связи
Выходные величины	Магнитная индукция, температура, форма и длина канала, время гашения
Анализируемые процессы	Устойчивое горение, энергетический кризис, разрушение канала ЭДО
Критерий гашения	Разрыв канала ЭДО

Для каждого режима фиксировались три характерные стадии горения ЭДО: устойчивое горение, энергетический кризис и разваливание канала ЭДО. Время гашения определялось от локального нуля, соответствующего моменту формирования устойчивого канала дуги, до момента его разваливания.

Логика настоящего исследования заключается в следующем. Разработанная модель гашения ЭДО в исследуемой дугогасительной камере должна воспроизводить направленное втягивание канала ЭДО в дугогасительную камеру, воспроизводить процесс угасания ЭДО по мере её растяжения, давать возможность определять время гашения ЭДО по

температурному состоянию канала ЭДО, которое можно сопоставить аналогичным временем аналогичных аппаратов с щелевыми камерами и камерами с дугогасительными решётками.

Настоящее исследование не заменяет стендовые испытания, но позволяет определить работоспособность исследуемого решения в рамках, обозначенных выше.

II. МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 показана карта распределения магнитной индукции в дугогасительном объёме исследуемой дугогасительной камеры.

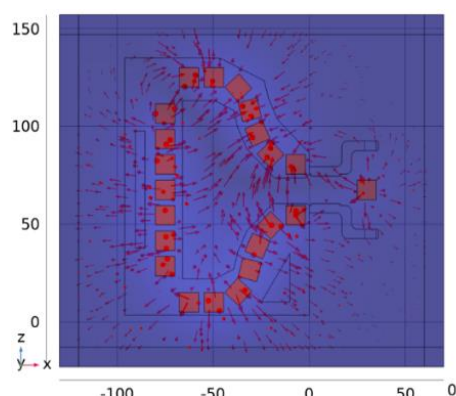


Рис. 3. Распределение магнитной индукции.
Fig. 3. Magnetic flux distribution.

Карта магнитной индукции показывает, что неоднородное поле постоянных магнитов занимает весь рабочий объём камеры. Это принципиально важно для заявленного механизма гашения ЭДО, которая не только втягивается в дугогасительную камеру, но продолжает растягиваться магнитным полем на последующих стадиях, когда её канал изгибается, удлиняется и расширяется.

Во всех расчетных режимах процесс гашения ЭДО имел одинаковую качественную структуру. Сначала формировалась фаза устойчивого горения с ярким высокотемпературным каналом. Затем наступала стадия энергетического кризиса, при которой канал становился длиннее и шире, а его световой спектр смещался в область длинных волн красноватого и оранжевого свечения. Финальная стадия характеризовалась разваливанием канала ЭДО и прекращением устойчивой проводящей связи между контактами.

Описанные выше наблюдения зафиксированы на рисунках 4-15. На данных

рисунках показаны фазы горения ЭДО, она же BEA (Breaking Electrical Arc).

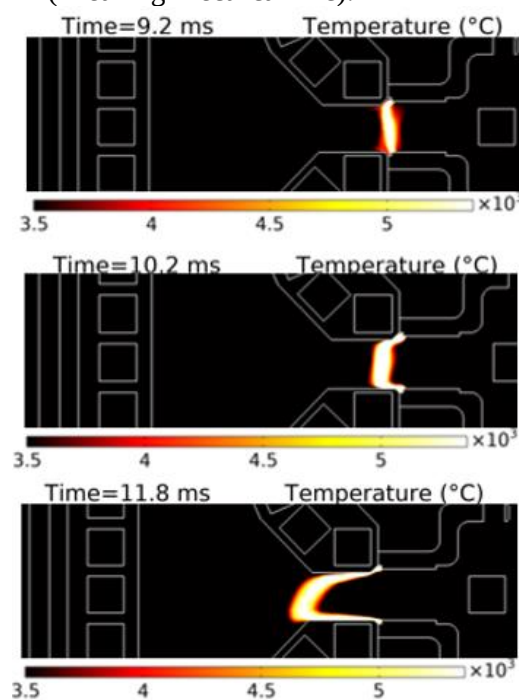


Рис. 4. Фаза устойчивого горения ЭДО (при токе 88 А).

Fig. 4. Steady-state BEA phase (at 88 A).

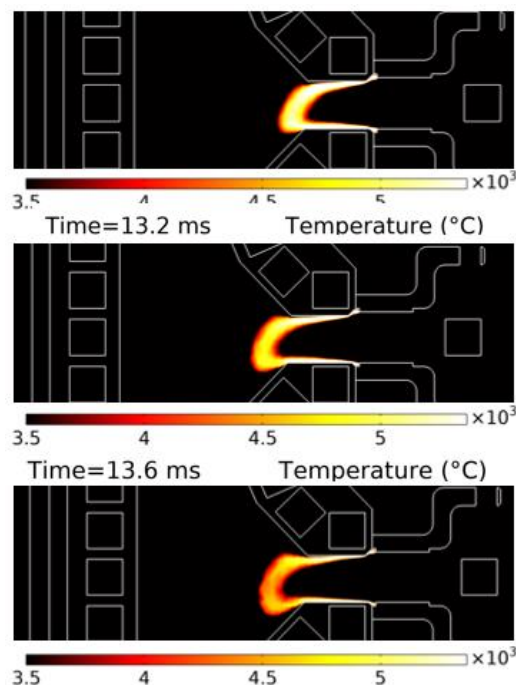


Рис. 5. Фаза энергетического кризиса ЭДО (при токе 88 А).

Fig. 5. BEA energy crisis phase (at 88 A).

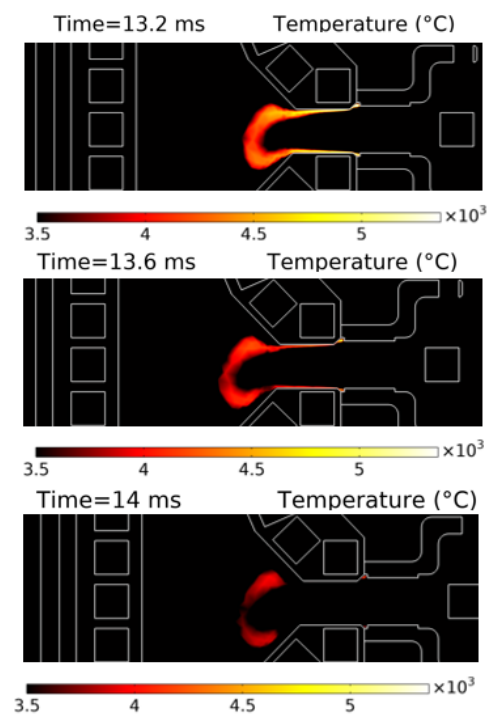


Рис. 6. Фаза разваливания канала ЭДО (при токе 88 А).

Fig. 6. BEA channel collapse (at 88 A).

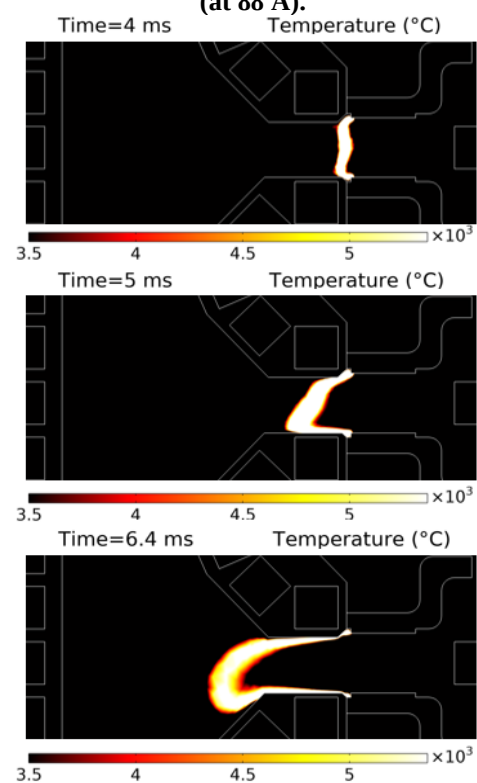


Рис. 7. Фаза устойчивого горения ЭДО (при токе 146 А).

Fig. 7. Steady-state BEA phase (at 146 A).

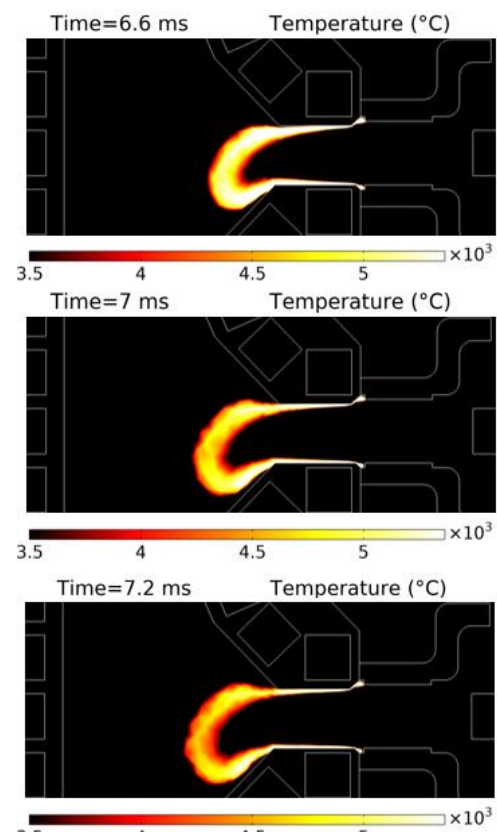


Рис. 8. Фаза энергетического кризиса ЭДО (при токе 146 А).

Fig. 8. BEA energy crisis phase (at 146 A).

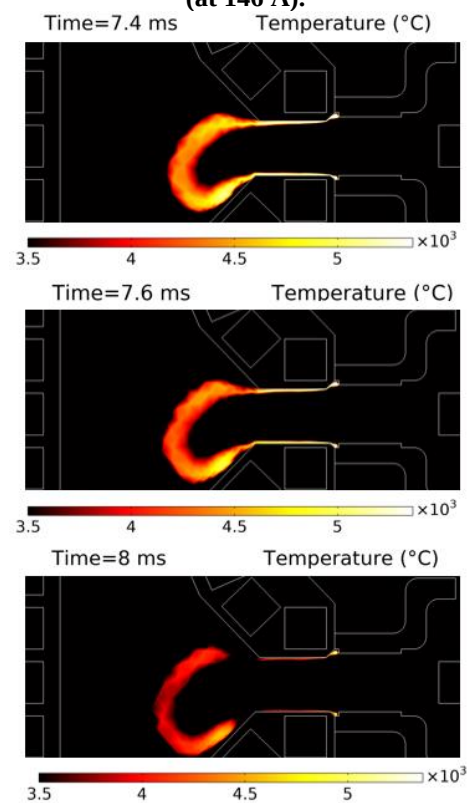


Рис. 9. Фаза разваливания канала ЭДО (при токе 146 А).

Fig. 9. BEA channel collapse

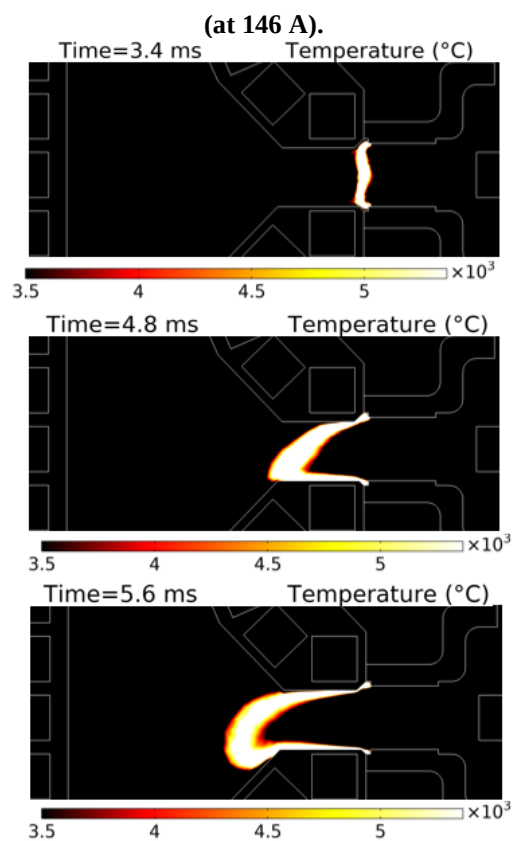


Рис. 10. Фаза устойчивого горения ЭДО (при токе 171 A).

Fig. 10. Steady-state BEA phase (at 171 A).

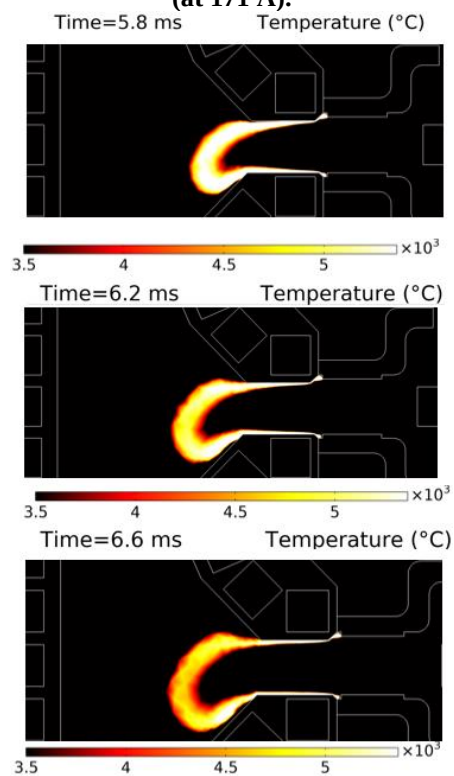


Рис. 11. Фаза энергетического кризиса ЭДО (при токе 171 A).

Fig. 11. BEA energy crisis phase (at 171 A).

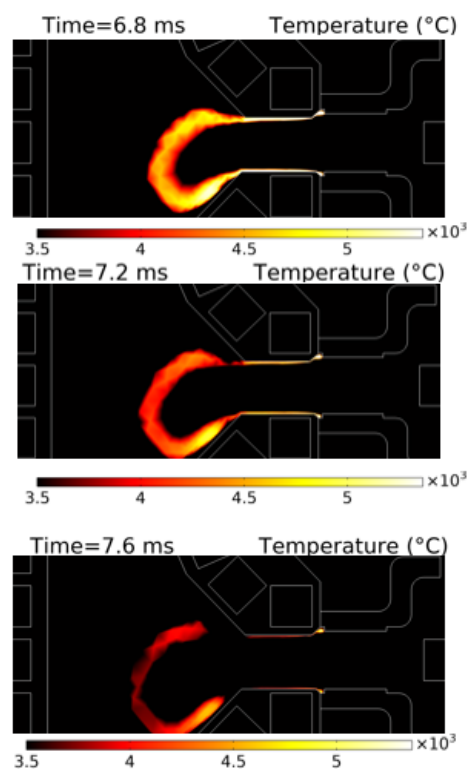


Рис. 12. Фаза разваливания канала ЭДО (при токе 171 A).

Fig. 12. BEA channel collapse (at 171 A).

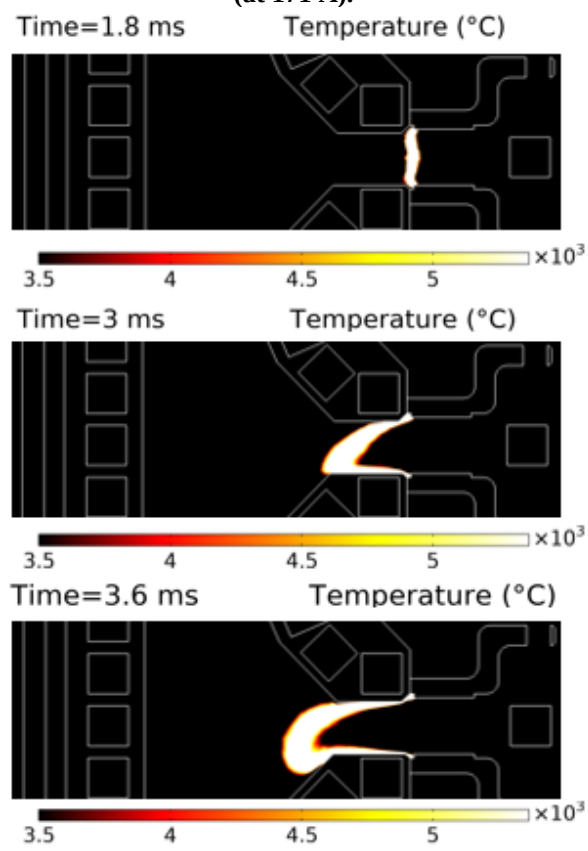


Рис. 13. Фаза энергетического кризиса ЭДО (при токе 0.4 кА).

Fig. 13 – Steady-state BEA phase (at 0.4 kA).

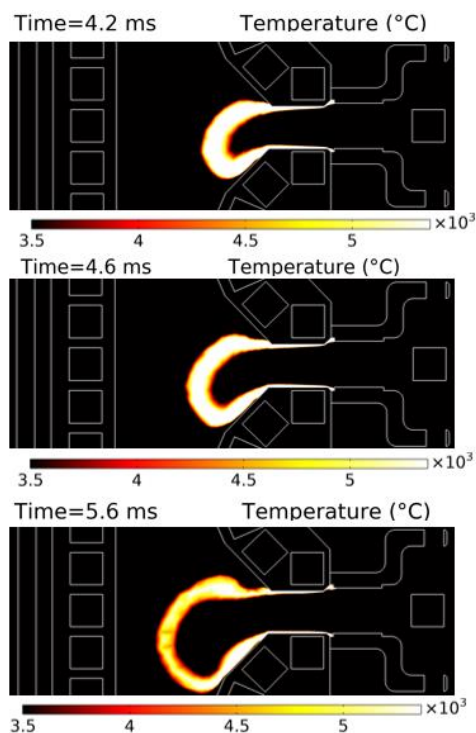


Рис. 14. Фаза разваливания канала ЭДО (при токе 0.4 кА).

Fig. 14. BEA energy crisis phase (at 0.4 kA).

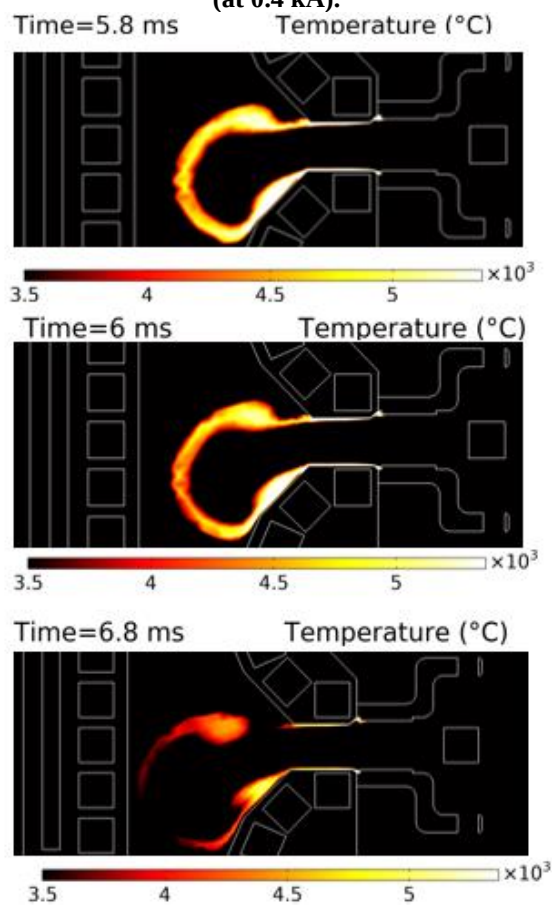


Рис. 15. Фаза разваливания канала ЭДО (при токе 0.4 кА).

Fig. 15. BEA channel collapse (at 0.4 kA).

В таблице 2 представлены сводные результаты проведенного моделирования. Аббревиатуры УГ, ЭК и РК обозначают стадии горения ЭДО. УГ – устойчивое горение, ЭК – энергетический кризис, РК – разваливание канала.

Таблица 2 (Table 2).

Длительность фаз ЭДО. BEA phases duration.

Ток	УГ (мс)	ЭК (мс)	РК (мс)	t(r) (мс)
88, А	2.6	1.0	1.0	4.8
146, А	2.2	0.6	0.6	4.0
171, А	2.2	0.8	0.8	4.2
0.4, кА	1.8	2.2	1.0	5.0

Данные таблицы 2 показывают, что зависимость времени гашения ЭДО от её тока не является линейной. Время гашения при токе 88 А больше, чем при токе 146 А, что объясняется увеличением силы Лоренца, которая ускоряет втягивание ЭДО в дугогасительную камеру и сокращает время гашения ЭДО. Но при дальнейшем увеличении тока энергия ЭДО, которая нужна для разваливания её канала, возрастает так, что, время гашения снова увеличивается.

На рисунке 16 показаны петли канала ЭДО при рассмотренных токах.

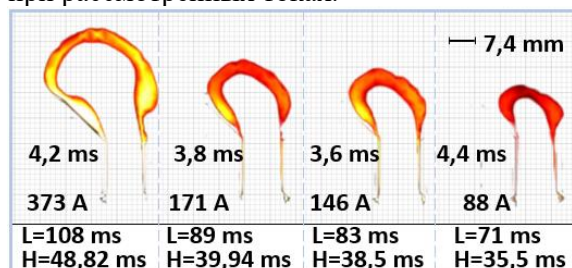


Рис. 16. Параметры ЭДО при различных токах.

Fig. 16. BEA parameters at different currents.

Результаты моделирования при токе 0.4 кА показывают практический предел исследуемой дугогасительной камеры. Время гашения ЭДО при токе 0.4 кА составило 5 мс. При этом перед разваливанием канала ЭДО периферия его петли почти достигла дальней стенки дугогасительной камеры. Тем не менее движение ЭДО было направлено строго внутрь дугогасительного пространства и распад её канала происходил также внутри расчётного объёма.

На рисунке 16 можно видеть наглядно разницу между каналами ЭДО при рассмотренных токах. С увеличением тока от 88 А до 0.4 кА длина петли канала ЭДО возросла с 71 до 108 мм, а его характерная

высота с 35.5 до 48.8 мм, соответственно. Таким образом, длина канала ЭДО возросла на 52%, а характерная высота канала ЭДО - примерно на 38% при росте тока от 88 А до 0.4 кА.

Полученные в ходе проделанной работы результаты подтверждают исходную гипотезу о эффективности непрерывного магнитного дутья ЭДО в течение всего времени коммутации. В щелевых дугогасительных камерах значительную часть времени коммутации занимает охлаждение канала ЭДО посредством стенок, а в дугогасительных камерах с дугогасительной решеткой - разбиение ЭДО на несколько последовательных и более малых ЭДО, их охлаждение и рост суммарного падения напряжения на них. В предлагаемой дугогасительной камере гашение ЭДО происходит посредством непрерывного удлинения и деформации канала ЭДО под действием постоянного неоднородного поля постоянных магнитов.

Сравнительная оценка эффективности исследуемой дугогасительной камеры и упомянутых решений не является строгой. Она показывает прикладную значимость результата, но не является полноценным вердиктом, для которого в действительности требуется разработка полноценного промышленного прототипа.

Тем не менее, для конкретизации этой оценки были рассмотрены контакторы, дугогасительные системы которых являются прямыми аналогами исследуемого решения. К примеру, контакторы серии КПВ-604 при токе 0.4 кА гасят ЭДО ориентировочно за 40 мс [25]. В современных исследованиях сообщается также и о гашении ЭДО с тем же током коммутации в дугогасительных решётках, время гашения при использовании которых составляет около 23 мс [26]. Кроме того, контакторы серии CT Schaltbau GmbH гасят ЭДО при том же токе коммутации за 50 мс [27].

При этом результаты компьютерного моделирования показали, что ЭДО с током коммутации 0.4 кА гасится в исследуемой дугогасительной камере за 5 мс. Следовательно, расчетное время гашения ЭДО оказалось существенно меньшим в сравнении с упомянутыми выше параметрами прочих исследованных контакторов.

Отдельно следует сказать о способности исследуемой дугогасительной камеры гасить

ЭДО при изменении направления тока. На сегодняшний день не существует контакторов, которые гасят ЭДО в двух направлениях тока, при помощи только постоянных магнитов.

Двунаправленная коммутация тока осуществляется посредством изменения количества полюсов контакторов, а также сочетанием постоянных магнитов и дугогасительных катушек [3-9].

В предлагаемой дугогасительной камере предусмотрено двунаправленное гашение ЭДО за счёт двух наборов постоянных магнитов в каждой камере, как это было сказано в разделе «методы исследования».

Однако окончательное подтверждение работоспособности исследуемой дугогасительной камеры при изменении направления тока коммутации подразумевает моделирование процесса дугогашения при изменении направления тока.

Данные на упомянутом ранее рисунке 16 также дают представление о том, что время гашения ЭДО изменяется от увеличения тока коммутации нелинейно. С одной стороны, больший ток увеличивает силу Лоренца и ускоряет втягивание ЭДО в дугогасительную камеру. С другой стороны, возрастает энергия канала ЭДО, которую необходимо рассеять для достижения энергетического кризиса ЭДО. Поэтому результаты моделирования при токе 146 А, 171 А и 0.4 кА демонстрируют компенсацию эффекта силы Лоренца посредством подпитки канала ЭДО большей энергией.

С энергетической точки зрения полученный результат следует связывать не только с уменьшением времени гашения, но и с перераспределением энергии ЭДО по длине её канала. Удлинение петли канала увеличивает поверхность теплоотдачи и снижает устойчивость его горения, но одновременно с этим накладывает более строгие требования к термостойкости дугогасительной камеры и к сохранению магнитных свойств постоянных магнитов. Поэтому при переходе к экспериментальному образцу необходимо регистрировать не только момент гашения, но и интегральную энергию ЭДО по осциллограммам тока и напряжения, максимальную температуру в зоне магнитов и признаки локального перегрева каркаса, а также магнитов.

Допущение данной работы состоит в расчетном характере полученных данных. Модель учитывает основные физические

процессы, но не заменяет экспериментальной проверки износа контактов, устойчивости магнитной системы к нагреву, влияния эрозии контактов на процесс дугогашения, разброса параметров магнитов и повторяемости гашения ЭДО.

Следующий этап исследования предполагает сопоставление результатов моделирования с результатами высокоскоростной съемки, а также с осциллограммами тока и напряжения.

Для практического применения исследуемой дугогасительной камеры необходимо масштабирование её конструкции.

Дальнейшее увеличение тока коммутации будет требовать большего дугогасительного объема, а также применения более высококоэрцитивных марок постоянных магнитов. Путь геометрического подобия дугогасительной камеры не может быть рассмотрен, как единственный путь масштабирования исследуемого технического решения. Дальнейшая оптимизация должна учитывать распределение магнитной индукции, допустимые расстояния от оси магнитного дутья до постоянных магнитов, термостойкость камеры и постоянных магнитов.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей работы проверена научная гипотеза о возможности гашения ЭДО постоянного тока исключительно за счет непрерывного действия постоянного неоднородного поля постоянных магнитов из материала N35.

В отличие от прочих решений, где магнитное дутье используется совместно с дугогасительной решеткой или щелевой дугогасительной камерой, в исследуемой дугогасительной камере постоянные магниты являются единственным способом воздействия на канал ЭДО.

Мультифизическое моделирование при напряжении 110 В и токах 88, 146, 171 А и 0.4 кА показало, что заданная конфигурация положения постоянных магнитов в пространстве позволила осуществить направленное втягивание ЭДО в дугогасительную камеру.

Кроме того, оно дало представление о стадиях гашения ЭДО, которых оказалось всего три. А именно: устойчивое горение,

энергетический кризис и разваливание канала ЭДО.

Расчётный результат состоит в том, что в исследованном диапазоне время гашения составило 4.0-5.0 мс: минимальное значение получено при токе 146 А, а для расчетного примера 0.4 кА время гашения составило 5 мс.

Сопоставление полученных результатов с опубликованными оценками для щелевых камер, камер с дугогасительными решётками в рамках научных исследований и промышленных решений показывает потенциальное преимущество исследуемой дугогасительной камеры в контексте времени гашения ЭДО.

Однако результаты носят расчётный характер и должны быть подтверждены экспериментами.

Практический вывод настоящей работы тезисно может быть сформулирован следующим образом.

Для масштабирования исследуемой дугогасительной камеры необходима разработка критериев геометрического подобия её конструкции, а также расчёт коэффициентов расстояния между осью магнитного дутья ЭДО и постоянными магнитами.

Предложенная камера может позволить создать базовую конструкцию для компактного и быстродействующего контактора постоянного тока, который способен коммутировать ток в двух направлениях.

Литература (References)

- [1] Veselovskiy O.N. Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky. Moscow, 2021. 348 p. (In Russian).
- [2] Tritle J.F. Air-Break Magnetic Blow-Outs for Contactors and Circuit Breakers Both A-C. and D-C. Journal of the American Institute of Electrical Engineers, 1922, vol. 41, pp. 257-266.
- [3] Schaltbau GmbH. CT - AC and bi-directional DC power contactor. Available at: <https://schaltbau.com/en/product/contactors/ct/> (accessed 06.06.2026).
- [4] Schaltbau GmbH. C320 - DC bidirectional switching. Available at: <https://schaltbau.com/en/product/contactors/c320/> (accessed 06.06.2026).
- [5] Sécheron SA. Contactor range. Type SEC. Brochure SG201096BEN_F08, 2025. Available at: https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2025/03/SG201096BEN_F08_Brochure_Contactors_SEC-03.25.pdf (accessed 06.06.2026).

- [6] Sécheron SA. High-speed DC circuit breakers. Type UR26. Brochure SG105306BEN_A10, 2024. Available at: https://www.secheron.com/wp-content/uploads/2024/07/SG105306BEN_A10_Brochure_Circuit-breaker-DC_UR26_03.24.pdf (accessed 06.06.2026).
- [7] Microelettrica. Railway Contactors. K Microelettrica Catalogue. Available at: <https://microelettricacatalogue.com/catalogue/mobility/products/components/railway-contactors/> (accessed 06.06.2026).
- [8] Hubbell Industrial Controls, Inc. DC Contactor. Type 716. Catalog 42716, 2023. Available at: <https://www.hubbelldirect.com/Products/DC%20Devices/PDF/Catalog%2042716.pdf> (accessed 06.06.2026).
- [9] Hubbell Industrial Controls, Inc. Type 720 200 Ampere 600 Volt DC Contactor. Catalog 42720, 2005. Available at: https://hubbellcdn.com/catalogfull/ICD_42720_CATALOG.pdf (accessed 06.06.2026).
- [10] Dong R., Yu C., Wang Y., Xu Z., Si J., Li W. Effect of installing magnetic blowout device on the health status of DC contactor. IET Conference Proceedings, 2021, vol. 2020, no. 3, pp. 1079-1083. [doi: 10.1049/icp.2021.0441](https://doi.org/10.1049/icp.2021.0441).
- [11] Peng S., Li J., Zhang Y., Liu Z., Liu S., Fu S., Huang C. Arc Re-strike in DC Contactor During Arc Splitting Process under Inhomogeneous Magnetic Field and its Evaluation Methodology. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2026. [doi: 10.1109/TCPMT.2026.3691875](https://doi.org/10.1109/TCPMT.2026.3691875).
- [12] Yin J., Lang X., Zhao Y., Zhang W., Liang S. Arc Simulation of High Voltage DC Molded Case Circuit Breaker. 2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA), Nanjing, China, 2023, pp. 733-738. [doi: 10.1109/ICoPESA56898.2023.10140833](https://doi.org/10.1109/ICoPESA56898.2023.10140833).
- [13] Zeng F., Kopp T., Boesche D., Claassen L., Vieth P., Kurrat M., Teroede M. Investigation of DC circuit breaker with extinguishing chamber at reduced ambient pressure for an application in avionics. NEIS 2023; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg, Germany, 2023, pp. 175-178.
- [14] Lin J., Wu J., Xia S., Chen R., Ma M. Multiobjective Optimization of Key Parameters for the Chamber of Low-Voltage DC Circuit Breakers Based on MHD. IEEE Transactions on Plasma Science, 2025, vol. 53, no. 1, pp. 88-98. [doi: 10.1109/TPS.2025.3528424](https://doi.org/10.1109/TPS.2025.3528424).
- [15] Wang T., Wang X., Ge X., Wei X., Lei X., Yang A., Yuan H. Research on Fault Simulation and Feature Signal Extraction of UR Type Rail Transit DC Circuit Breaker by Secheron. 2025 8th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Wuxi, China, 2025, pp. 966-970. [doi: 10.1109/CEEPE64987.2025.11033755](https://doi.org/10.1109/CEEPE64987.2025.11033755).
- [16] Cho Y.-M., Park H.-J., Lee J.-J., Lee K.-A. Analysis of Characteristics of Low Voltage Circuit Breaker by External Magnetic Field. Energies, 2022, vol. 15, no. 21, art. 8156. [doi: 10.3390/en15218156](https://doi.org/10.3390/en15218156).
- [17] Zhou X., Zhou Y., Li D., Zhai G. Suppression of Swirl Arc Re-Strike under Magnetic Blowing for DC High-Power Application. IEEE Access, 2023, vol. 11, pp. 141576-141585. [doi: 10.1109/ACCESS.2023.3341511](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3341511).
- [18] Vassa A., Carvou E., Rivoirard S., Doublet L., Bourda C., Ben Jemaa N., Givord D. DC-arc blowing under pulsed magnetic field. 26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012), Beijing, 2012, pp. 23-29. [doi: 10.1049/cp.2012.0616](https://doi.org/10.1049/cp.2012.0616).
- [19] Yoshida K., Sawa K., Suzuki K. Influence of Magnetic Flux Density on Magnetic Blow-out of Direct Current High Voltage Arc. 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, 14-18 Oct. 2018, New York, IEEE, 2018, pp. 189-195. [doi: 10.1109/HOLM.2018.8611775](https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611775).
- [20] Lizan I.Ya. Theoretical Foundations of Electrical Engineering. 2nd ed. Moscow; Vologda, Infra-Engineering Publ., 2026. 628 p. (In Russian).
- [21] Rong M., Yang F., Wu Y., Murphy A.B., Wang W., Guo J. Simulation of Arc Characteristics in Miniature Circuit Breaker. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, vol. 38, no. 9, pp. 2306-2311. [doi: 10.1109/TPS.2010.2050703](https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2050703).
- [22] Xiong D., Chen S., Xiao Y., Ma C. Simulation study on arc motion process of DC miniature circuit breakers. AIP Advances, 2023, vol. 13, no. 10, art. 105112. [doi: 10.1063/5.0174184](https://doi.org/10.1063/5.0174184).
- [23] Gatri A., Gonzalez J.-J., Freton P., Joyeux P., Sambou F. Numerical modeling of electric arc in a low voltage breaking chamber. Plasma Physics and Technology, 2025, vol. 12, no. 3, pp. 190-196. [doi: 10.14311/ppt.2025.3.190](https://doi.org/10.14311/ppt.2025.3.190).
- [24] Majumdar P. Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer. CRC Press, 2025.
- [25] Lobov B.N., Kondratyev V.A., Belokopytov S.A. Algorithm of design calculation of slotted arc extinguishing chamber. Elektromekhanika i energetika, 2013, no. 2, pp. 33-38. (In Russian).
- [26] Johansson E., Andersson A., Johansson G., Johansson M. Breaking Performance of a Novel DC Contactor Concept. 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, NM, USA, 2018, pp. 483-487. [doi: 10.1109/HOLM.2018.8611644](https://doi.org/10.1109/HOLM.2018.8611644).
- [27] Hofmann H., Weindl C., Al-Amayreh M. I. and Nilsson O., "Arc Movement Inside an AC/DC Circuit Breaker Working With a Novel Method of Arc Guiding: Part I—Experiments, Examination, and Analysis," *IEEE Transactions on Plasma*

Science, vol. 40, no. 8, pp. 2028-2034, Aug. 2012,
[doi: 10.1109/TPS.2012.2200697](https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2200697).

Сведения об авторах.



**Кириллов Илья
Владимирович, аспирант**
Область научных интересов:
Электрические аппараты
низкого,
среднего и высокого
напряжения
ORCID: [0009-0009-8635-2114](https://orcid.org/0009-0009-8635-2114)
E-mail:
KirillovIV@mpei.ru



**Дергачев Павел
Андреевич, к.т.н.**
Область научных интересов:
Электрические машины,
электрические аппараты
низкого, среднего и высокого
напряжения
ORCID: [0000-0003-1631-7187](https://orcid.org/0000-0003-1631-7187)
E-mail:
DergachevPavA@mpei.ru