

УДК 537.533  
EDN: XKZULY

PACS: 52.80



## Использование внешних неоднородных магнитных полей для увеличения ресурса высоковольтных вакуумных выключателей

М. А. Завьялов, Т. М. Сапронова, В. А. Сыровой

*Сформулирована модель массивной частицы, подверженной действию силы Ампера в неоднородном магнитном поле, позволяющая оптимизировать движение контрагированной дуги по поверхности контакта с целью его минимального повреждения.*

*Ключевые слова:* контрагированная дуга, неоднородное магнитное поле, полюсные наконечники.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-5-9

### Введение

В практике создания и применения высоковольтных вакуумных выключателей известен способ использования поперечного к оси прибора магнитного поля, создаваемого током самой дуги, пропускаемого через специальным образом профилированные контактные пластины и виток определенной конфигурации, помещаемый в теле прибора [1]. Возникающая сила Ампера  $\vec{J} \times \vec{B}$ , где  $\vec{J}$  – ток дуги,  $\vec{B}$  – магнитная индукция, приводит дугу во вращение, что способствует более равномерному нагреву контакта, уменьшению испарения контактного материала, и тем самым увеличивает ресурс прибора.

Упомянутые выше конструктивные элементы, реализующие эту красивую идею, подбирались экспериментальным путем, поскольку адекватные математические модели отсутствуют из-за сложности и многообразия физических процессов, сопровождающих различные формы дугообразования (контрагированная и дисперсная фазы). Существование дуги связано с формированием и динамикой катодных пятен, испарением и осаждением материала на стенки камеры, объемными процессами в теле дуги и т. д.

В отличие от реализованного способа управления дугой ниже исследуется вопрос об использовании неоднородного внешнего магнитного поля, создаваемого магнитными наконечниками специальной формы.

Преимуществом предлагаемого подхода является возможность оптимизировать в процессе математического моделирования конфигурацию магнитного поля, обеспечивающего движение дуги по спирали, с ясным критерием: покрытие дугой при движении максимальной площади контакта. При этом упрощается внутренняя конструкция прибора за счет формы контакта (отсутствие профилированных лепестков) и ликвидации токоподводящего витка, при помощи которого создавалось магнитное поле.

**Завьялов Михаил Александрович**, в.н.с., д.т.н., профессор.

**Сапронова Татьяна Михайловна**, н.с.  
E-mail: sapron0109@mail.ru

**Сыровой Валерий Александрович**, гл.н.с., д.ф.-м.н.  
E-mail: v.a.surovoy@gmail.com  
ВЭИ-филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ  
им. академ. Е. И. Забахина».  
Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 12.

Статья поступила в редакцию 31.01.2023

После доработки 19.02.2023

Принята к публикации 2.03.2023

© Завьялов М. А., Сапронова Т. М., Сыровой В. А., 2023

### Описание модели

Модель использует безусловный физический закон: сила Ампера действует на дугу с произвольной сложности пространственной конфигурацией, которая нам не известна. Дуга представлена в виде цилиндра (плазменного столба), имеющего конечную массу и поддерживаемого собственным азимутальным магнитным полем. Движение дуги проецируется на плоскость контакта, где она принимает вид массивной частицы с массой  $m$ .

Оценка массы материала, образующего дугу (пары меди) дает слишком малое значение  $m$ . Упомянутые выше сложные процессы,

по-видимому, участвуют в определении ускорения под действием силы Ампера, что приводит к понятию эффективной массы, оценить которую можно по известным экспериментальным результатам: за полупериод колебаний тока (10 мсек) в магнитном поле порядка 30 мТ дуга совершала около десяти оборотов.

В цилиндрической системе координат  $R, \psi, z$  с осью  $z$ , направленной по оси прибора, и координатах  $R, \psi$  в плоскости контакта движение массивной частицы определено уравнениями

$$\begin{aligned} \ddot{R} &= -PJB_{\psi}, & R\ddot{\psi} + \dot{R}\dot{\psi} &= PJB_R, \\ P &= J_*B_*L_* / mv_*^2. \end{aligned} \quad (1)$$

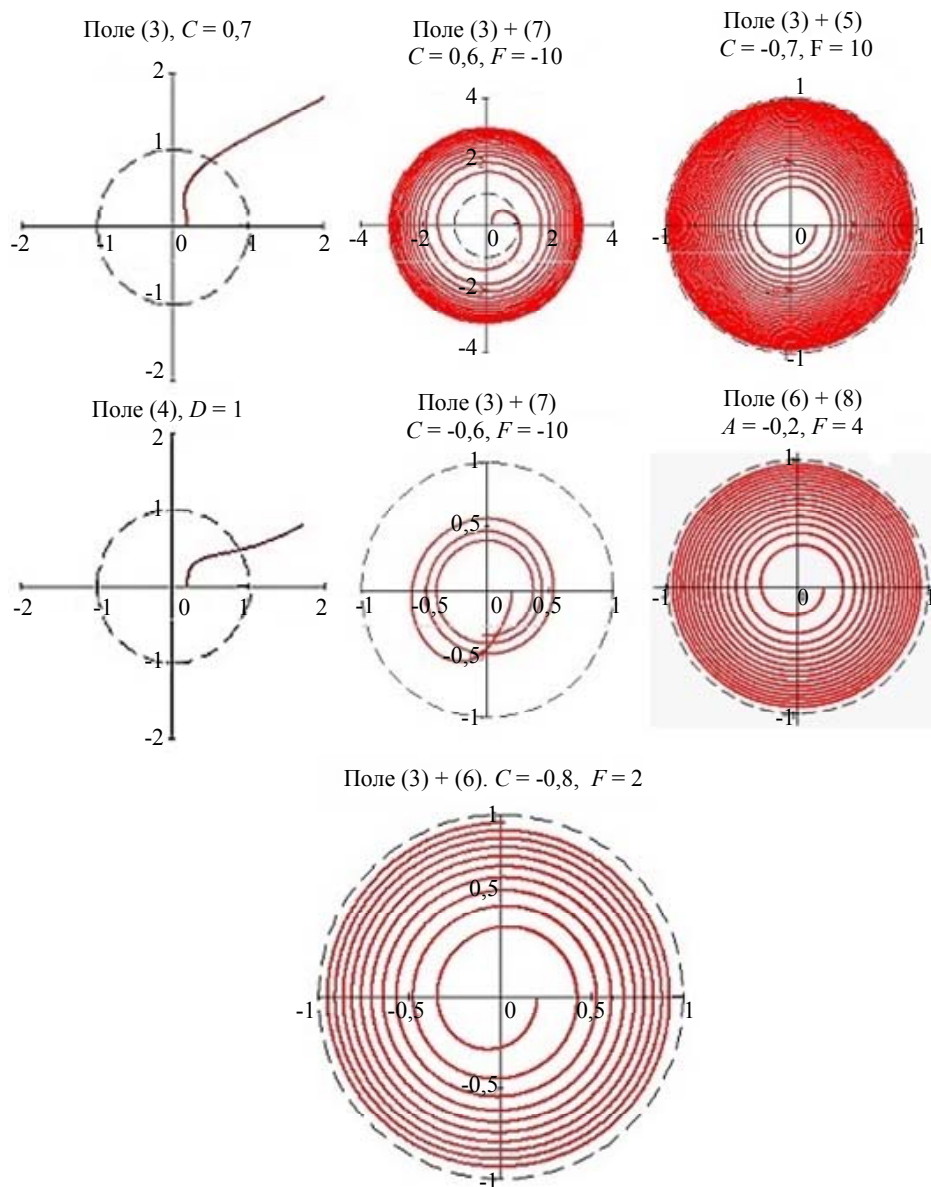


Рис. 1. Траектория дуги в различных комбинациях неоднородных магнитных полей

При записи уравнений (1) использованы нормировки с учетом характерных значений входящих в задачу величин (символы со звездочкой):

$$\begin{aligned} L_* &= 1 \text{ см}, T_* = 10^{-3} \text{ сек}, \\ J_* &= 10^3 \text{ А}, B_* = 10^{-3} \text{ Т}, v_* = L_*/T_*. \end{aligned} \quad (2)$$

Движение дуги анализировалось в плоских магнитных полях со скалярным потенциалом  $\chi$ , включающим квадратичные и кубические комбинации декартовых координат  $x, y$

$$\chi = C(x^2 - y^2), \quad C = \text{const}; \quad (3)$$

$$\chi = D(x^3 - 3xy^2), \quad D = \text{const}; \quad (4)$$

в полях с аксиальной симметрией

$$\chi = FI_0(kR) \cos(kz); \quad (5)$$

$$\chi = F(R^2 - 2z^2); \quad (6)$$

$$\chi = F\left(\frac{3}{32}R^4 - \frac{3}{4}R^2z^2 + \frac{1}{4}z^4\right), \quad (7)$$

где  $I_0$  – функция Бесселя чисто мнимого аргумента,  $F, k = \text{const}$ ,  $k = \pi/12$ , и их комбинациях с добавлением однородного магнитного поля по оси  $x$

$$\chi = Ax, \quad A = \text{const}. \quad (8)$$

На рис. 1 представлены результаты расчетов траектории дуги в различных комбинациях полей (3)–(8). Видно, что плоские поля не являются эффективными, дуга быстро выносится на периферию плоскости контакта. Она так же быстро выходит за пределы контакта для поля (3) + (7); этот вариант оказывается неприемлемым и при одинаковых знаках коэффициентов  $C, F$ .

Вполне удовлетворительными с точки зрения покрытия дугой максимальной площади контакта являются варианты: (3) + (5),  $C = -7, F = 10$ ; (3) + (6),  $C = -0,8, F = 2$ ; (6) + (8),  $A = -0,2, F = 4$ .

### Полюсные наконечники

Форма полюсных наконечников при использовании магнитомягких материалов определяется поверхностями  $\chi = \text{const}$ . Рассмотрим несколько примеров наконечников, создающих поле нужной конфигурации. Пусть для варианта

$$\chi = C(x^2 - y^2) + F(R^2 - 2z^2) \quad (9)$$

установлены значения интенсивностей  $C, F$ , обеспечивающих требуемый закон вращения дуги. Поверхности  $\chi = -K^2 = \text{const} < 0$  определяют семейство двуполостных гиперболоидов, между которыми по оси  $z$  может быть расположен прибор

$$\frac{x^2}{K^2(F+C)} + \frac{y^2}{K^2(F-C)} - \frac{z^2}{K^2/(2F)} = -1. \quad (10)$$

В сечениях  $z = \text{const}$  поверхность (10) имеет эллиптический контур.

Для варианта с однородным магнитным полем вдоль оси  $x$  имеем

$$\chi = Ax + F(R^2 - 2z^2), \quad \bar{x} = x + A/(2F),$$

$$\frac{\bar{x}^2}{(\bar{A}/F)} + \frac{y^2}{(\bar{A}/F)} - \frac{z^2}{(\bar{A}/2F)} = -1, \quad (11)$$

$$\bar{A} = K^2 - \frac{A^2}{4F} > 0.$$

В системе координат  $\bar{x}, y, z$  со сдвигом по  $x$  поверхность  $\chi = \text{const}$  также является двуполостным гиперболоидом, ось которого смещена относительно оси прибора. Кроме того эта поверхность представляет собой поверхность вращения, что повышает ее технологичность. Поверхности  $\chi = \text{const}$  для варианта

$$\chi = C(x^2 - y^2) + FI_0(kR) \cos(kz) \quad (12)$$

представлены на рис. 2. Они напоминают поверхности квадруполей, параметры которых меняются от сечения к сечению  $z = \text{const}$ ,

причем значения  $\chi$  возрастают по вертикали и убывают по горизонтальной оси.

Поле (3) + (5),  $C = -0,7$ ,  $F = 10$

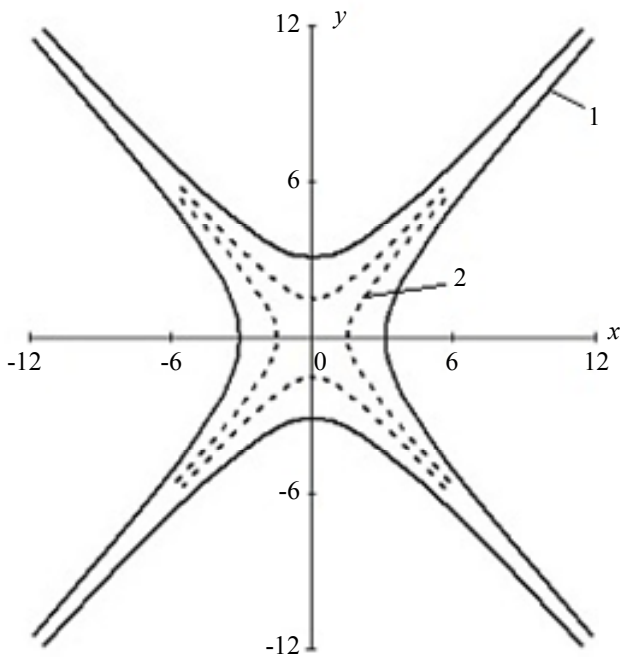


Рис. 2. Полюсной наконечник в сечениях 1 –  $z = 0$ ,  $\chi(0) = 3,51$ ,  $\chi(\pi/2) = 16,83$ ; 2 –  $z = 1$ ,  $\chi(0) = 3,51$ ,  $\chi(\pi/2) = 6,66$

Пусть в варианте (9) установлены значения интенсивностей  $C$ ,  $F$ . Зададим точку  $z_*$  на оси  $z$ , в которой должна находиться вершина гиперboloида  $\chi = \text{const}$ . Компоненты магнитного поля для случая (9) имеют вид

$$\begin{aligned} B_R &= 2CR \cos 2\psi - 2FR, \\ B_\psi &= -2CR \sin 2\psi, \quad B_z = 4Fz. \end{aligned} \quad (13)$$

Значение константы в правой части уравнения  $\chi = \text{const}$ , определяющей форму наконечника, и величина  $B_z$  связаны с коэффициентом  $F$ :

$$\chi_* = 2Fz_*^2, \quad B_{z_*} = 4Fz_*. \quad (14)$$

Необходимое магнитное поле будет обеспечено поверхностью  $\chi = \chi_*$ , если при намагничивании добиться значения  $B_{z_*}$  в вершине гиперboloида. Переход от бесконечной поверхности  $\chi = \chi_*$  к конечному фрагменту без существенного нарушения точности решения является вполне достижимой задачей,

если учесть описанную в работе [2] трансформацию бесконечного идеального цилиндрического магнитного квадрупольа к колоколообразной квадрупольной модели (рис. 3 по результатам работы [2]).

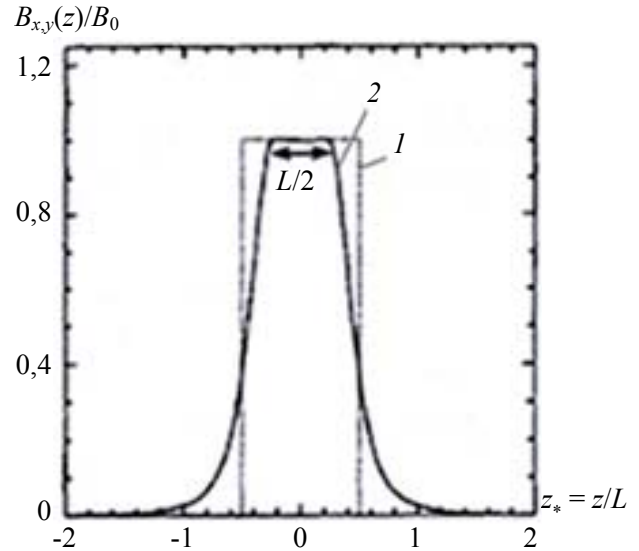


Рис. 3. 1 – идеальная квадрупольная модель; 2 – колоколообразная модель

При использовании магнитомягких материалов встает задача о синтезе формы наконечника по известной конфигурации магнитных силовых линий. Эта постановка, по видимому, не вызывала интереса у специалистов, работающих с постоянными магнитами. Аналогичная задача с электрическими полями формулируется как обратная задача по отношению к определению поля заданных электродов. Однако в монографиях и обзорах по постоянным магнитам понятие обратной задачи связывается с проблемами выявления дефектов в теле магнита [3, 4].

## Заключение

На основании сформулированной простой модели движения контрагированной дуги удается установить конфигурацию неоднородного магнитного поля, обеспечивающего максимальную площадь покрытия вращающейся дугой поверхности контакта. Полученные рекомендации позволяют рассчитать геометрию полюсных наконечников, что, в конечном счете, может привести к упрощению конструкции высоковольтного выключателя и увеличению его ресурса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белкин Г. С. Коммутационные процессы в электрических аппаратах. – М.: ЗНАК, 2003.
2. Basten M. A., Booske J. H. / IEEE Trans. Plasma Science. 1994. Vol. 22. № 5. P. 960.
3. Коген-Далин В. В., Комаров Е. В. Расчёт и испытания систем с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1977.
4. Денисов П. А., Абраамян А. Л., Жлоба Ю. А. и др. / Современные наукоемкие технологии. 2016. № 9-1. С. 23.

PACS: 52.80

## Application of non-homogeneous magnetic fields for increasing of operation time of high-voltage vacuum switches

*M. A. Zav`yalov, T. M. Sapronova and V. A. Syrovoy*

VEI – Branch of FSUE RFNC-VNIITF named after Academician E. I. Zababakhin  
12 Krasnokazarmennaya st., Moscow, 111250, Russia

*Received 31.01.2023; revised 19.02.2023; accepted 2.03.2023*

***The model of massive particle under Amper force action in non-homogeneous magnetic field is formulated for description and optimization the arc movement on contact surface of vacuum switch.***

*Keywords:* compressed electric arc, non-homogeneous magnetic field, magnetic pole tip.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-5-9

## REFERENCES

1. Belkin G. S., Commutation Processes in Electric Apparatus, Moscow, ZNAK, 2003 [in Russian].
2. Basten M. A. and Booske J. H., IEEE Trans. Plasma Science **22** (5), 960 (1994).
3. Kogen-Dalin V. V. and Komarov E. V., Calculation and Tests of Systems with Constant Magnets, Moscow, Energiya, 1977 [in Russian].
4. Denisov P. A., Abraamyan A. L., Complaint Yu. A. et al., Modern high technologies, № 9-1, 23 (2016) [in Russian].