

УДК 621.385

## Моделирование дугового разрядника с анодом в виде индуктора

*Дрозд И.М., д.т.н., проф. Кузьмичев А.И., Майкут С.О.,  
к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю.*

Вакуумные коммутаторы (ВК) это приборы на основе вакуумного-дугового разряда, используемые для прерывания тока в цепях импульсных генераторов и защиты от короткого замыкания [1,2]. Их разработка является актуальной задачей вакуумной и плазменной электроники. На основе таких приборов конструируются высоковольтные электронные системы.

Для быстрого прерывания тока используются вакуумные лампы и полупроводниковые приборы, но недостатком вакуумных ламп является большое падение напряжения на них, а полупроводниковые коммутаторы рассчитаны на невысокое коммутируемое напряжение. На ВК на дуговом разряде в парах материала катода падает малый потенциал, около 10-30 вольт, т.е. такое же напряжение, как и в твердотельной электронике. При этом коммутируемые токи могут составлять десятки килоампер.

Эффективность ВК во многом определяется характеристиками управления и надёжного гашения вакуумной дуги. Один из способов

прерывания дуги основан на генерации в межэлектродном промежутке импульсного магнитного поля (МП), поперечного к электрическому [1,2]. Причём индукция МП должна быть достаточной для резкого возрастания импеданса замагниченной плазмы в дуговом разряде, а падение напряжения на дуге должно достигать уровня напряжения источника питания. Исследования подтвердили практическую эффективность импульсного магнитного способа управления разрядом [3]. Однако физические процессы гашения дуги в вакуумном коммутаторе ещё не до конца исследованы, в том числе процессы, которые могут приводить к повторному зажиганию дуги в период деионизации плазмы и конденсации пара в условиях нарастания напряжения на электродах [3].

Цель данной работы – физико-топологическое моделирование магнитной отсечки катодных электронов от анода. Процесс отсечки очень важен для заключительного этапа прерывания тока. Оно затруднено остаточной

термоэмиссией катода и вторичной  $\gamma$ -эмиссией при бомбардировке катода остаточными ионами.

В данной работе процесс отсечки электронов моделировали в системе с анодом в виде индуктора. При этом для создания МП используется ток пропускаемый через анод-индуктор. Такой подход позволяет эффективно генерировать магнитное поле, т.к. оно максимально приближено к поверхности анода [4].

Исследуемая система представлена на рис.1, где: 1 – катод (его коническая вершина служит эмитирующей поверхностью), 2 – анод (нижняя поверхность его нижнего витка служит коллектором электронов). Отметим, что в работе фактически моделируются процесс магнитной отсечки электронов именно от нижней поверхности анода.

Нижний виток анода одновременно защищает остальные витки от запыления металлическим конденсатом испаряющегося материала катода. Такая конструкция позволяет не вводить дополнительный электрод (индуктор) в конструкцию ВК.

На рис.1 приведены размеры элементов моделируемой системы

При расчётах определялись:

- величина и распределение токов в аноде;
- распределение магнитного поля в пространстве ВК;

- распределение электрического поля в пространстве ВК;
- траектории электронов, эмитированных катодом;
- условия прерывания тока.

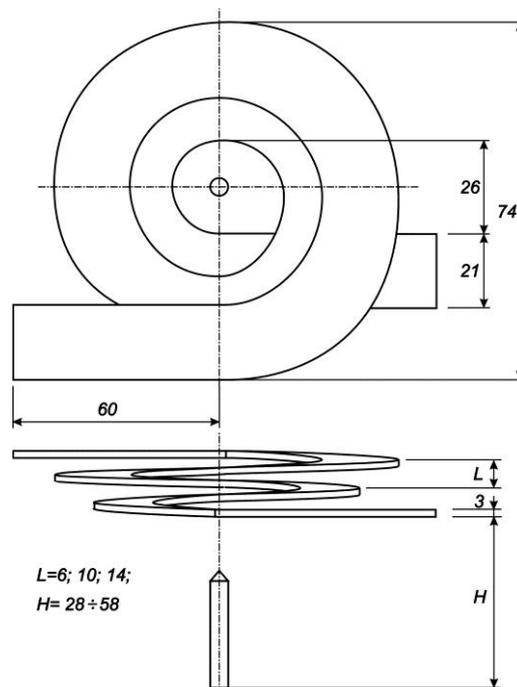


Рис. 1 – Конструкция электродов

Алгоритм расчётов параметров процессов в ВК реализован согласно физико-топологической модели, представленной на рис.2. Она включает математические модели электрического поля между анодом и катодом, магнитного поля индуктора, модель эмиссии электронов с поверхности катода и кинетическую модель движения электронов в электромагнитном поле. Исследования выполнены численным расчётом параметров по указанным на рис.2 моделям с использованием программного пакета COMSOL [5].

Физико-топологическая модель также учитывает влияние геометрических размеров всех элементов ВК, эмиссионные, электрические и магнитные свойства материалов, напряжение на электродах, токи анода.

Определение поля токов анода, конфигурации электрического и

магнитного полей производилось по математической модели, основанной на уравнениях Максвелла для вакуума и проводящей среды и граничных условиях, адаптированных к форме элементов ВК (здесь и далее использовались общепринятые обозначения векторов).

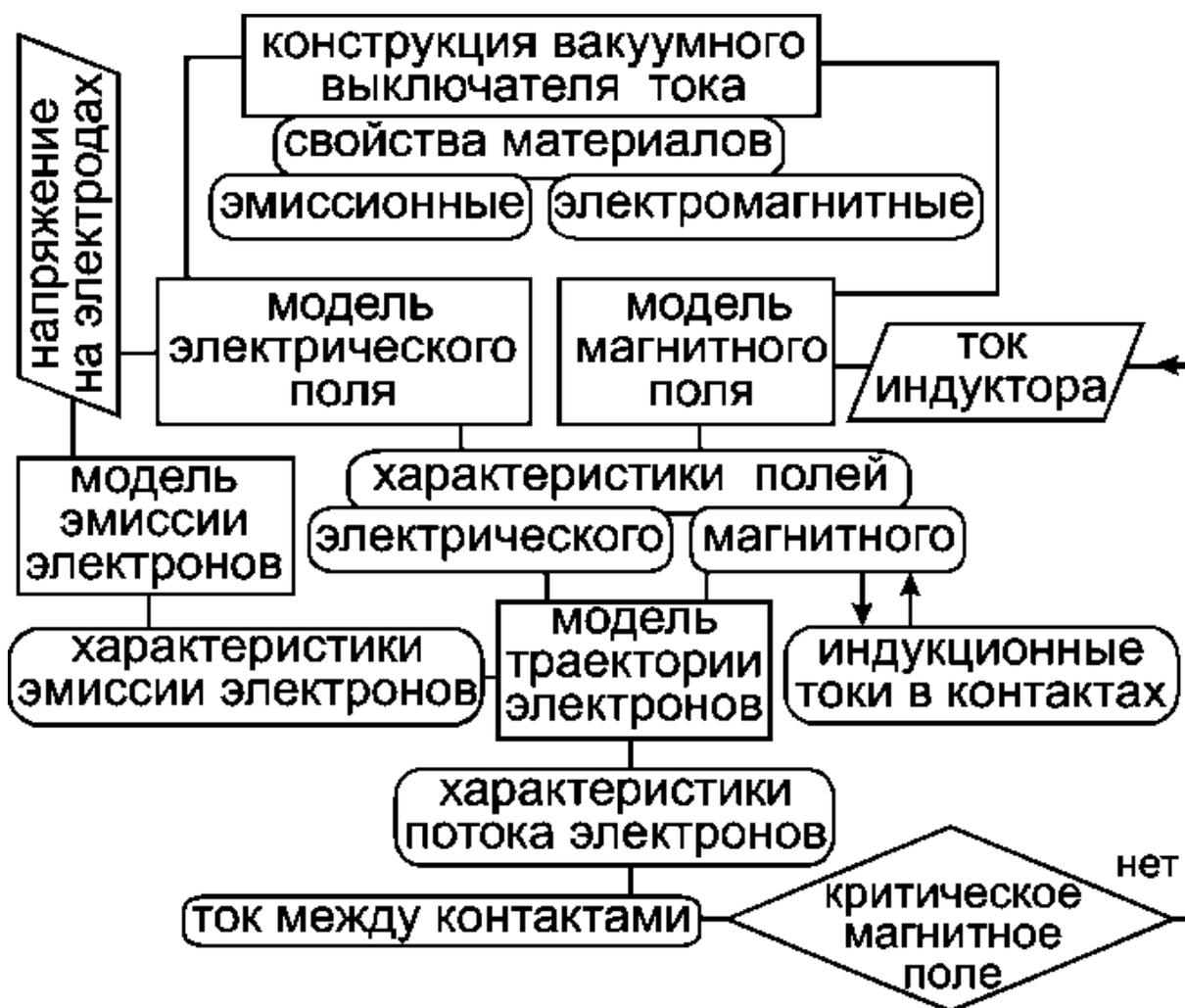


Рис. 2 – Физико-топологическая модель численного расчёта параметров ВК с учётом индукции вихревых токов на аноде

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J}; \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho = 0; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

В уравнении (1) член  $\partial \mathbf{D} / \partial t$  не учитывался вследствие низких рабочих частот (меньше 1 МГц), а в уравнении (3) не учитывался пространственный заряд из-за его незначительной роли при высоких напряжениях, применяемых в ВК.

Система уравнений (1)–(4) дополнялась материальными уравнениями:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \mathbf{E}; \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{H}; \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума и  $\sigma$  - электрическая проводимость материала анода (медь). Вектор электрической поляризации  $\mathbf{P}$  и магнитный вектор  $\mathbf{M}$  принимались равными нулю.

При решении системы уравнений Максвелла применялись общепринятые граничные условия.

Начальная кинетическая энергия электронов, эмитируемых с поверхности катода задавалась равной нулю. Направление вылета с поверхности определялось направлением силовых линий электрического поля. Эмиссия электронов задавалась равномерным распределением

точек эмиссии по поверхности катода.

Модель траектории электронов в электрическом и магнитном полях в пространстве ВК основана на втором законе Ньютона под действием силы Лоренца ( $\mathbf{F}$ ):

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]); \quad (8)$$

где  $e$  и  $\mathbf{v}$  - заряд и скорость электрона, соответственно. Расчёт траекторий движения электронов по этой модели производился с учётом дифференциальных параметров предварительно вычисленных электрического и магнитного полей. Сила, действующая на электрон, определялась по значению векторов  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{v}$  в точке пространства нахождения электрона. Затем по закону Ньютона определялось перемещение электрона в следующую точку, где расчёт повторялся. Дискретизация рассчитываемой траектории и структура полей оптимизировалась по математическим алгоритмам метода конечных элементов.

Расчёт траекторий выполнялся в квазистационарном приближении, т.е. в пренебрежении изменениями переменных полей за время пролёта электронов между электродами.

Как известно, при определённых напряжённых электрического и магнитного полей электроны не могут достигнуть анода под действием силы Лоренца, которая отклоняет электроны от направления действия силовой

линии электрического поля. Для этого индукция магнитного поля  $B$  должна быть больше некоторой критической величины  $B_{кр}$  [3].

Система параметров исследуемого объекта приведена в табл. 1

| Параметр              | Величина    |
|-----------------------|-------------|
| Длительность импульса | 5-10 мкс    |
| Ток индуктора         | 600 - 900 А |
| Количество витков     | 3           |
| Шаг витка индуктора   | 6 - 14 мм   |
| Расстояние анод-катод | 43 - 58 мм  |
| Радиус нижнего витка  | 32 мм       |
| Диаметр катода        | 5 мм        |
| Рабочее напряжение    | 10 кВ       |

### Результаты и обсуждение

На рис.3 показано распределение электрического поля между электродами ВК. Симметрия поля в области анода-индуктора нарушается, вследствие несимметричной геометрии анода.

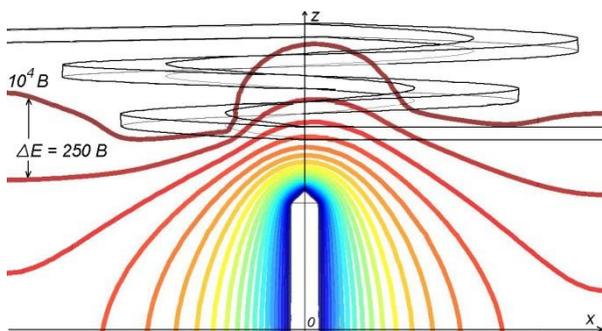


Рис. 3 – Распределение электростатического поля с шагом эквипотенциалов в 500 вольт для поперечного сечения

Распределение индукции магнитного поля вдоль оси анода-индуктора при токе анода 600 ампер представлено на рис.4.

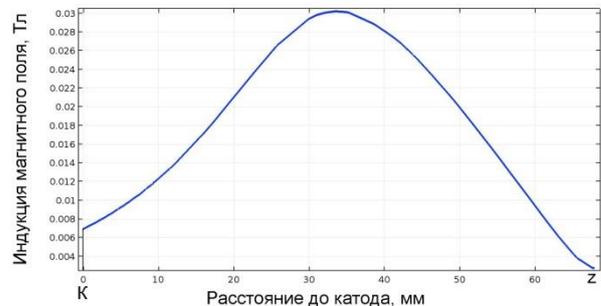


Рис.4 – Распределение индукции магнитного поля на оси анода-индуктора (К – острие катода)

Полученные распределения полей позволяют определить траекторию электронов внутри анода-индуктора. При расчёте траектории (трассировке) заряд электрона округлялся до  $1,6 \times 10^{-19}$  Кл и масса – до  $9,1 \times 10^{-31}$  кг. Траектории рассчитывались для 300 частиц, равномерно эмитируемых с конической части катода (вершины). Для наглядности на рисунках показаны 30 траекторий частиц.

На рис.5 показаны траектории электронов в ВК по истечении одной наносекунды ( $10^{-9}$  с) импульса тока индуктора величиной 900 А. Расстояние катод-анод задано в 22 мм. Видно, что шаг спирали не оказывает существенного влияния на фокусировку электронов.

На рис.8 представлены траектории электронов в ВК при

токе индуктора 900 А и расстоянии катод-анод – 12 мм. Сравнение траекторий показывает, что расстояние от катода до анода существенно влияет на фокусировку электронов, т.е. на эффективность отсечения электронов от анода. Электроны, рассеянные в область катода (на

рисунках – вниз), по окончании импульса тока индуктора имеют вероятность вернуться на анод. Поэтому, фокусировка электронов над анодом является целью исследования влияния на неё конструктивных параметров ВК.

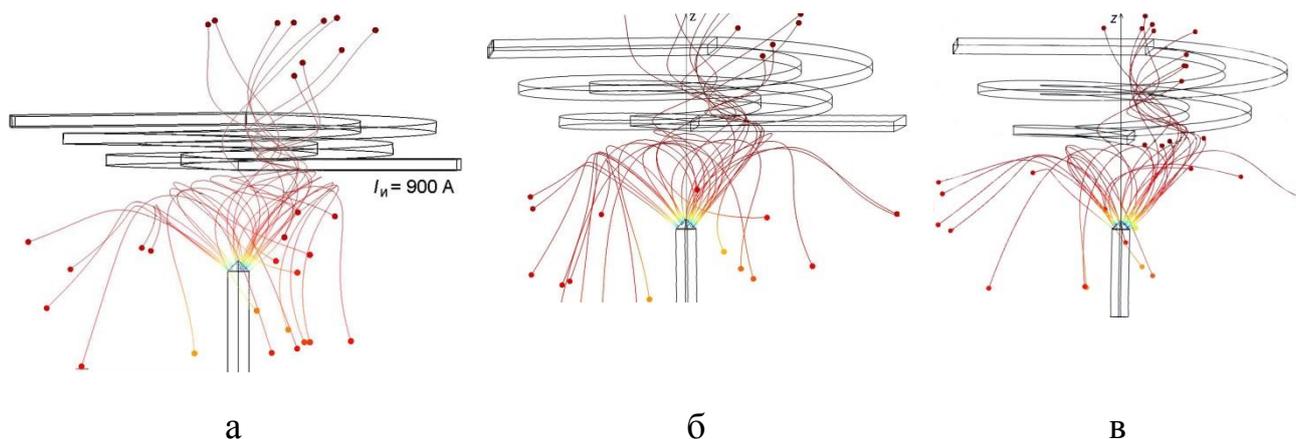


Рис.5 – Траектории электронов в ВК при расстоянии катод-анод 22 мм и разных шагах витков анода-индуктора: а – 6 мм; б – 10 мм; в – 14 мм

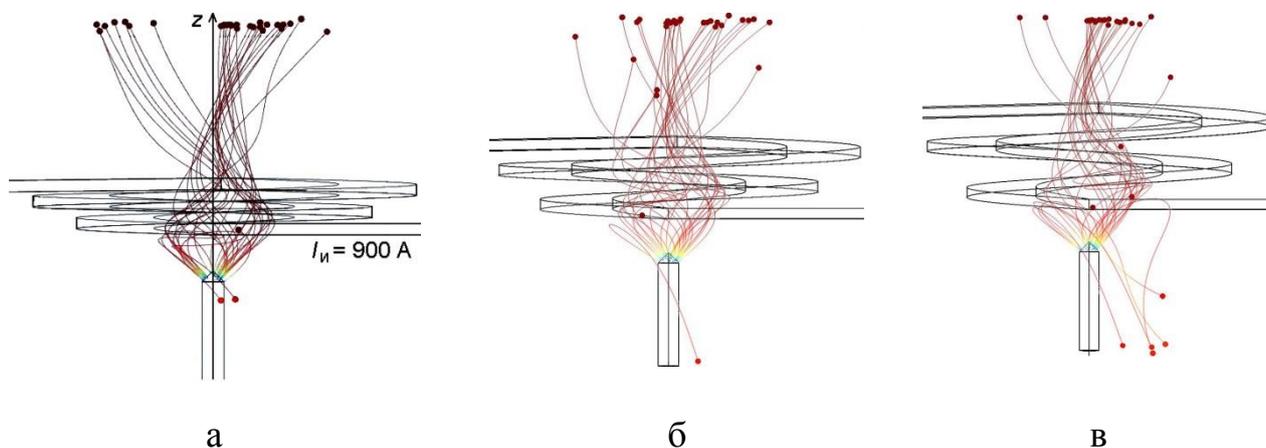


Рис. 6 – Траектории электронов в ВК при расстоянии катод-анод 12 мм и разных шагах витков анода-индуктора: а – 6 мм; б – 10 мм; в – 14 мм

Сравнение траекторий электронов на рис.7 и рис.6 б (ток анода-индуктора 600 А и 900 А соответственно) позволяет

определить достаточный ток эффективной отсечки электронов для выбранной конструкции. При импульсе тока в 600 А

длительностью 1 нс 30% электронов (9 из 30) не покинули область анода (рис.9), а при 900 А – только 1 (рис.8,б).

На рис.8 представлены результаты расчёта эффективности отсечки электронов ВК в зависимости от амплитуды импульса тока индуктора при различном шаге витков индуктора

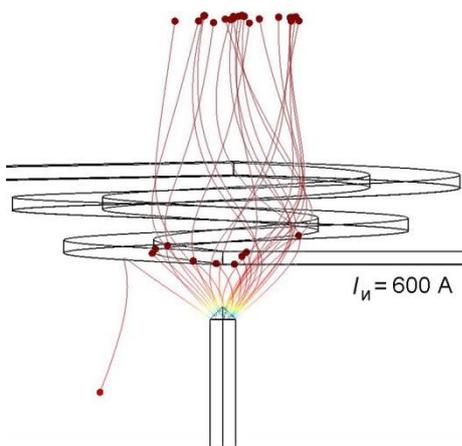


Рис. 7 – Траектории электронов в ВК при расстоянии катод-анод 10 мм

Уменьшение шага витков индуктора и амплитуды импульса тока в нём приводит к увеличению напряжённости магнитного поля в области катода, что улучшает фокусировку электронов. При шаге витков индуктора 6 мм и амплитуде импульса тока 900 А все эмитированные с катода электроны фокусируются за пределы анода. Сфокусированные электроны могут направляться на дополнительный конструктивный электрод (коллектор) или рассеиваться в дальнейшем, при выборе оптимальных режимов коммутации ВК.

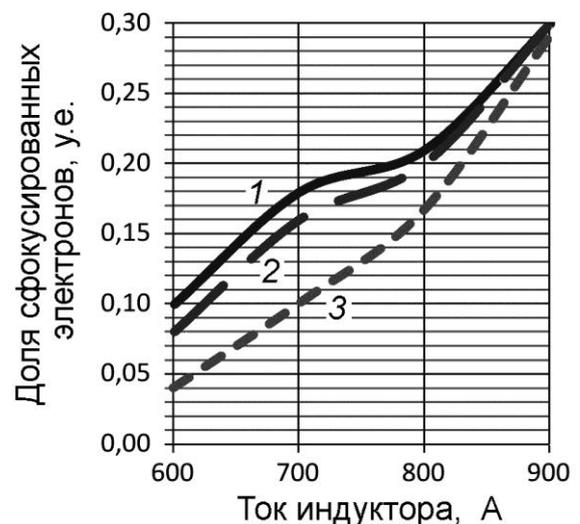


Рис. 8 – Зависимость доли сфокусированных электронов от тока индуктора при различном шаге витков индуктора: 1 – 6 мм, 2 – 10 мм, 3 – 14 мм

Уменьшение шага витков индуктора ограничено возможностью возникновения между витками разности потенциалов достаточной для электрического пробоя между ними. Оптимальный шаг витков индуктора должен выясняться в отдельном исследовании.

Расчёты показали, что снижение расстояния катод-анод ниже 12 мм приводит к ухудшению фокусировки электронов.

### Выводы

Выполнено моделирование процесса магнитной отсечки электронов от анода в форме индуктора в осесимметричном МП.

Определено влияние конструктивных параметров на эффективность отсечки электронов.

Для исследуемой конструкции оптимальное расстояние катод-анод составило 12 мм. По результатам расчётов, снижение расстояния между витками индуктора повышает эффективность отсечки электронов, что подтверждает физическую адекватность математической модели и правильность расчётов.

В предложенной конструкции индуктора с тремя витками полная отсечка электронов, при напряжении анод-катод 10 кВ, происходила при импульсе тока индуктора – 900 А.

Полученные результаты могут использоваться при разработке конструкции ВК для систем с прерыванием тока вакуумно-дугового разряда.

### Литература

1. Elektricheskie i elektronnye apparaty [Electrical and electron apparatuses]. Vol. 1. Electromechanical apparatuses / Ed. A.G. Godzhello, Yu. K.

Rozanov. Moscow: Publ. Center “Academia”, 2010. 352 p.

2. Markov A. M. Modern vacuum breakers // News of Pskov State University. Ser. Technical Sci. 2016. No. 6/ P. 110-116.
3. С. А. Майкут, И. М. Дрозд, А. И. Кузьмичев и Л. Ю. Цибульский, «Исследование отсечки электронов в плоском диоде магнитным полем плоского индуктора,» Электроника и Связь, т. 22, № 4, pp. 21-27, 2017.
4. Дрозд И. М., Вакуумно дуговой прерыватель тока. - Авт. Свид. СССР № 1274026, 1986. / И.М. Дрозд, В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичев и др. - Бюл. №44, 1986.
5. COMSOL Multiphysics® Software URL: <https://www.comsol.com/>