

## Вакуумна, плазмова та квантова електроніка

УДК 621.385

DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.4.105967](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.4.105967)

# Исследование отсечки электронов в плоском диоде магнитным полем плоского индуктора

Майкут С. А., ORCID [0000-0002-0913-4190](https://orcid.org/0000-0002-0913-4190)e-mail [s.maikuta@kpi.ua](mailto:s.maikuta@kpi.ua)Дрозд И. М., ORCID [0000-0001-5152-1787](https://orcid.org/0000-0001-5152-1787)e-mail [drozd@modem.com.ua](mailto:drozd@modem.com.ua)Кузьмичев А. И., доц, к.т.н., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)e-mail [a.kuzmichev@kpi.ua](mailto:a.kuzmichev@kpi.ua)Цибульский Л. Ю., доц, к.т.н., ORCID [0000-0002-7431-6417](https://orcid.org/0000-0002-7431-6417)e-mail [meef@i.ua](mailto:meef@i.ua)

Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Киев, Украина

**Реферат**—Исследуется эффект отсечки электронов в плоском диоде магнитным полем внешнего плоского индуктора на примере вакуумных выключателей (ВВ) с плоскими контактами. Эти приборы выбраны для исследования в связи с их большой востребованностью в современной высоковольтной силовой электротехнике. Использование эффекта отсечки позволяет подавить рентгеновское излучение из ВВ, возникающее при сближении контактов, когда электроны автоэмиссии с отрицательного контакта бомбардируют положительный контакт. Исследования выполнены на физико-топологической модели, с помощью которой определялись электрическое и магнитное поля и учитывалось вторичное магнитное поле, генерируемое вихревыми токами, индуцированными в контактах. Рассчитывались траектории электронов, определялась критическая величина тока индуктора, при которой электроны не достигали положительного контакта и имел место эффект отсечки. Исследования показали целесообразность снабжения контакта под индуктором радиальными щелями в количестве не менее 4-х для снижения критического тока индуктора на десятки процентов. Выявлены нарушения эффекта отсечки на краях контактов, где нарушена ортогональность электрического и магнитного полей, и требуется оптимизация конфигурации электродов. Разработанная модель также может применяться для анализа условий магнитного инициирования магнетронного разряда между плоскими электродами в газоразрядных приборах и источниках заряженных частиц.

Библ. 13, рис. 7, табл. 2.

**Ключевые слова** — отсечка электронов в магнитном поле; скрещенные поля; импульсный индуктор; вакуумный выключатель; рентгеновское излучение; физико-топологическая модель.

### I. ВВЕДЕНИЕ

Эффект отсечки электронов в скрещенных полях, когда магнитное поле ортогонально электрическому полю и не позволяет электронам попадать на анод, находит применение во многих электронных приборах: магнетронных генераторах СВЧ, магнетронных устройствах для ионного распыления материалов, манометрических преобразователях для измерения вакуума, коммутирующих приборах (вакуумных выключателях, газоразрядных приборах магнетронного типа), электронно-лучевых приборах. Случай отсечки электронов в однородных полях рассмотрен

в литературе [1]. Однако на практике чаще всего применяют неоднородное магнитное поле, при этом его генерация осуществляется как постоянными магнитами, так и соленоидами или индукторами [2-5]. Индукторы применяют для генерации импульсного магнитного поля с целью управления процессами, происходящими в вакуумных выключателях (ВВ), а также в импульсных газоразрядных приборах и устройствах магнетронного типа [2, 4-7]. Однако, по нашим данным, эффект отсечки электронов в плоских электродных системах с импульсным магнитным полем при учёте индукции вихревых токов в электродах в литературе не изучался.



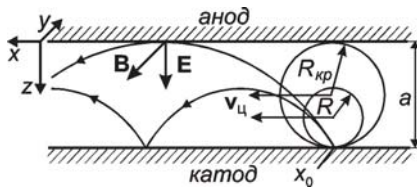


Рис. 1 Циклоидное движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях

В настоящее время ВВ являются востребованными приборами для современной высоковольтной силовой электротехники, так как они превосходят по массо-габаритным параметрам и эксплуатационным характеристикам высоковольтные выключатели с газовой и масляной изоляцией [2-5, 8-12]. Недостатком ВВ является генерация рентгеновского излучения опасного для персонала и полупроводниковой аппаратуры. Источником рентгеновского излучения являются электроны, которые тормозятся на поверхности контакта с высоким положительным потенциалом. Электроны появляются вследствие автоэлектронной эмиссии [1] с отрицательного контакта при высоком напряжении ( $> 10$  кВ) и малом расстоянии (до нескольких миллиметров) между контактами, т.е. в период срабатывания ВВ.

Таким образом, важной проблемой является минимизация рентгеновского излучения во время срабатывания ВВ. Решить эту задачу можно, используя эффект отсечки электронов в скрещенных полях, применяя внешний индуктор для генерации магнитного поля. Магнитное поле полезно и с точки зрения воздействия на вакуумный дуговой разряд, возникающий в ВВ при разведении контактов, т.к. оно заставляет вращаться разрядный столб, снижая тем самым тепловое воздействие на контакты и их эрозию.

В выключателях часто применяются плоские контакты, и они в разведенном состоянии представляют собой плоский вакуумный диод, однако отсечка автоэмиссионных электронов с использованием внешнего индуктора, размещенного с нерабочей стороны плоских контактов, в литературе не рассмотрена [2-5, 8-12].

Цель данной работы - исследование условий достижения эффекта отсечки электронов в ранее неизученной диодной системе плоских контактов ВВ с индуктором в виде плоской спирали. Из-за трудностей экспериментальных исследования они будут выполнены путём расчётов на модели. Для этого будет разработана и представлена новая физико-топологическая математическая модель ВВ с диодной структурой плоских контактов и будет проведено численное исследование отсечки токов автоэлектронной эмиссии в магнитном поле внешнего импульсного индуктора в виде плоской спирали с учётом индукции вихревых токов в контактах ВВ. Результаты моделирования будут использованы для выработки рекомендаций по конструированию ВВ.

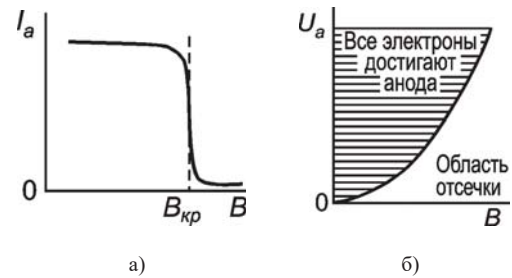


Рис. 2 Отсечка тока в скрещенных полях (а) и парабола критического режима (б)

## II. ЭФФЕКТ ОТСЕЧКИ ЭЛЕКТРОНОВ

В идеальном случае траектория электронов в скрещенных полях имеет форму циклоиды (рис. 1) [1]. Эффект отсечки заключается в том, что под действием силы Лоренца электроны отклоняются от направления действия силовой линии электрического поля и не попадают на анод, т.е. в вакууме прекращается ток на положительный контакт – анод (рис. 2а). Для этого индукция магнитного поля  $B$  должна быть больше некоторой критической величины  $B_{кр}$  (рис. 2б).

Таким образом, высота циклоиды в режиме отсечки меньше расстояния  $d$  между контактами. При  $B = B_{кр}$  высота циклоиды и диаметр окружности, образующей циклоиду,  $2R_{кр}$  равны  $d$ . Отсюда:

$$B_{кр} = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2m}{e} U}. \quad (1)$$

где  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона,  $U$  – напряжение на контактах. В дальнейшем (1) будет использоваться для верификации численных расчётов.

## III. КОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛИРУЕМОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

На рис. 3 приведена упрощённая диодная конструкция контактов ВВ с плоским индуктором в разомкнутом состоянии. Для построения топологической модели ВВ вводим систему геометрических параметров, представленную в табл.1, с указанием значений, использованных при моделировании.

В модель были введены следующие физические параметры: проводимость индуктора и контактов из меди; напряжение, приложенное к контактам  $U$ ; количество ампервитков индуктора  $I \cdot W$ ; частота импульсного тока индуктора  $f = 1, 5, 10$  и  $50$  кГц.

## IV. ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВВ

Обобщённая структурная схема физико-топологической модели ВВ, разработанная в данной работе, представлена на рис. 4. Она включает модели для электрического и магнитного полей, модель эмиссии электронов и кинетическую модель движения электронов в электромагнитном поле с учётом действия силы Лоренца. Расчёт по математическим моделям осуществлялся в среде Comsol® Multiphysics®.



ТАБЛИЦА 1. ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВВ

Параметр	Обозначение	Размер, мм
Внешний диаметр индуктора (плоская спираль)	$D1$	60
Диаметр верхнего контакта	$D2$	60
Диаметр нижнего контакта	$D3$	60
Внутренний диаметр индуктора	$d1$	10
Диаметр отверстия в верхнем контакте	$d2$	10
Расстояние между индуктором и контактом	$\Delta 1$	5
Расстояние между контактами	$\Delta 2$	10
Толщина индуктора	$\delta 1$	5
Толщина верхнего контакта	$\delta 2$	5
Толщина нижнего контакта	$\delta 3$	5
Ширина радиальных щелей в верхнем контакте	$\delta 4$	1
Количество радиальных щелей в верхнем контакте	$N$	$0 \div 8$

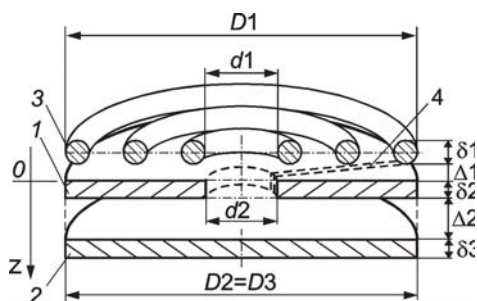


Рис. 3 Модель конструкции ВВ с плоскими контактами (1, 2) и плоским индуктором (3). 4 – радиальная щель в верхнем контакте

При расчётах определялись:

- 1) Величина и распределение токов в контактах и индукторе.
- 2) Распределение магнитного поля между контактами ВВ.
- 3) Распределение электрического поля между контактами ВВ.
- 4) Траектории электронов, эмитированных нижним контактом.
- 5) Условия отсечки электронов.

Электромагнитная часть математической модели ВВ основывалась на уравнениях Максвелла для вакуумной и проводящих сред в ВВ и граничных условиях, адаптированных к нашему случаю (здесь и далее использовались общепринятые обозначения векторов [13]):

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

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

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

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

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

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

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon_0 \mathbf{E}; \quad (5)$$

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

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

где  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\mu_0$  - магнитная проницаемость вакуума, и  $\sigma$  - электрическая проводимость материала индуктора и контактов (меди). Вектор электрической поляризации  $\mathbf{P}$  и магнитный вектор  $\mathbf{M}$  принимались равными нулю.

При расчёте магнитного поля учитывалось поле, создаваемое непосредственно индуктором, и вторичные магнитные поля, генерируемые индукционными токами в контактах ( $j_{\text{вихр}}$ ). При этом ток в индукторе учитывался как сумма стороннего тока, возбуждённого внешней электрической цепью  $j_{\text{стор}}$ , и вихревого тока  $j_{\text{вихр}}$ , индуцированного переменным магнитным полем токов контактов:

$$j = j_{\text{стор}} + j_{\text{вихр}}. \quad (8)$$

При решении системы уравнений Максвелла для разных частей (сред) ВВ применялись общепринятые граничные условия, используемые при расчётах индукционного нагрева [13]).

Начальная кинетическая энергия (скорость) электрона задавалась равной нулю. Направление вылета с поверхности нижнего контакта ВВ (эмиттера) варьировалось при расчётах

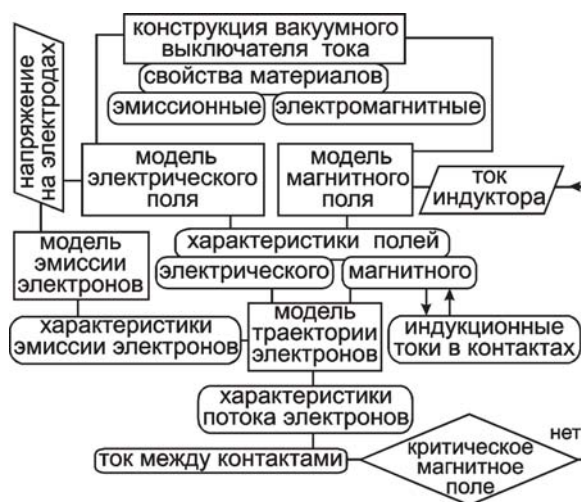


Рис. 4 Структура физико-топологической математической модели ВВ с учётом индукции вихревых токов в контактах



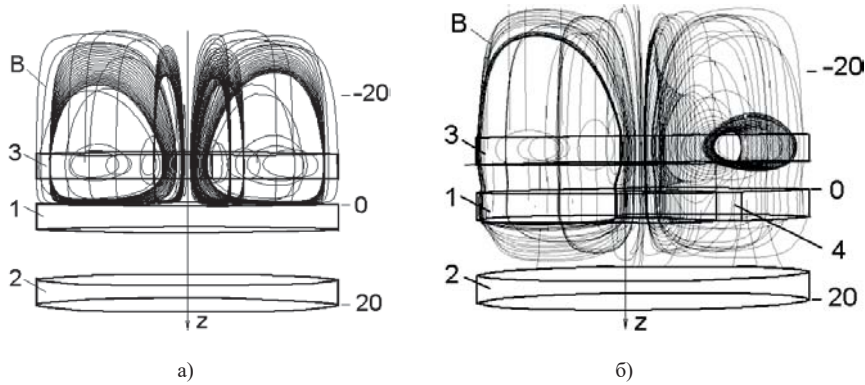


Рис. 5 Силовые линии магнитного поля в ВВ с контактами без щелей (а) и с радиальной щелью в верхнем контакте (б);  $f = 50$  кГц,  $IW = 1,5$  кА·вит.

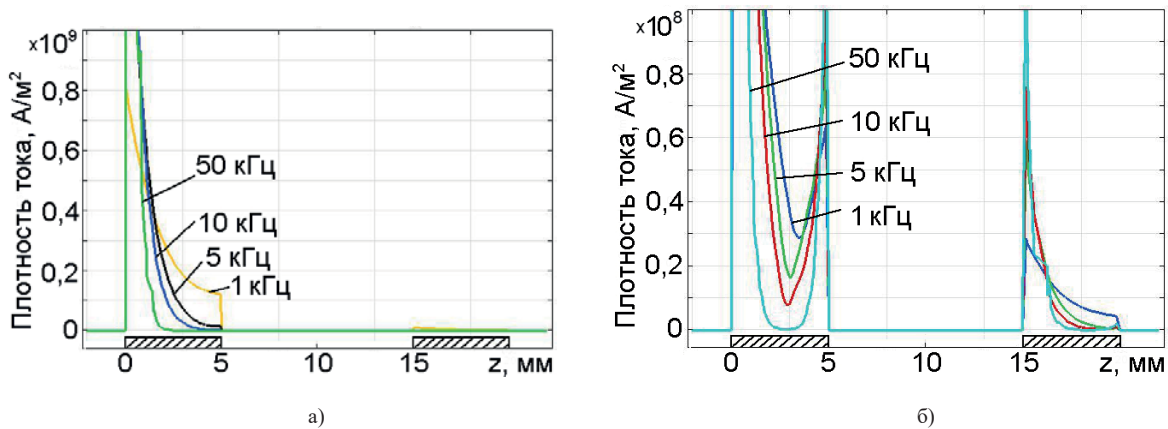


Рис. 6 Распределение плотности вихревого тока индукции в теле контактов в ВВ с контактами без щелей (а) и с радиальной щелью в верхнем контакте (б) при разной частоте питания индуктора;  $IW = 1,5$  кА·вит.

Модель эмиссии электронов с катодного (нижнего) контакта задавалась равномерным распределением точек эмиссии по поверхности контакта и нулевой начальной скоростью.

Кинетическая модель движения электронов в электрическом и магнитном полях между контактами ВВ основано на втором законе Ньютона с учётом действия силы Лоренца ( $\mathbf{F}$ ):

$$\mathbf{F} = -e(\mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{B}]), \quad (9)$$

где  $e$  и  $\mathbf{v}$  – заряд и скорость электрона, соответственно. Эта модель использовалась для расчёта траектории движения электронов и определения тока индуктора, при которых происходит их отсечка от анодного (верхнего) контакта. Расчёт траекторий выполнялся в квазистационарном приближении, т.к. можно пренебречь изменениями переменных полей за время пролёта электронов между контактами.

Ток индуктора, при котором происходила отсечка электронов, определялся путём серии расчётов при задании тока индуктора, начиная с минимальных значений.

#### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 5 приведены результаты расчётов конфигурации силовых линий магнитного поля, а на рис. 6 приведены распределения плотности вихревого тока индукции в теле контактов в ВВ с контактами без щелей (а) и с радиальной щелью в верхнем контакте (б). На рис. 6 положения контактов обозначены заштрихованными прямоугольниками.

Можно видеть, что в килогерцевом диапазоне частот при отсутствии щели в верхнем контакте имеет место магнитная экранировка – даже на частоте 1 кГц генерируется очень слабое магнитное поле в пространстве между контактами и индуцируется незначительный вихревой ток в нижнем контакте.

Ситуация кардинально меняется при наличии щели. Радиальная щель в верхнем контакте превращает систему “индуктор – верхний контакт” в своеобразный трансформатор с плоской одновитковой вторичной обмоткой (её роль играет верхняя поверхность верхнего контакта), нагруженной плоским одновитковым индуктором (его роль играет нижняя поверхность верхнего контакта). Кондуктивная связь между плоскостями осуществляется по внутренним стенкам радиальной щели. Плоский одновитковый

индуктор генерирует магнитное поле в промежутке под верхним контактом и наводит вихревой ток в нижнем контакте. Последний генерирует вторичное магнитное поле в промежутке, согласованное по направлению с первичным полем плоского одновиткового индуктора. В результате, магнитное поле концентрируется в промежутке между контактами за счёт экранирующего действия хорошо проводящего тела нижнего контакта.

Из рис. 5б следует, что в большей части промежутка генерируется в основном радиальное магнитное поле, ортогональное электрическому полю, которое направлено по оси  $z$ . Эти поля и обеспечивают отсечку электронов, эмитированных нижним контактом с отрицательным потенциалом.

На рис. 7 приведены траектории электронов, эмитированных из средней части нижнего контакта. Как видно, эффект отсечки проявляется в полной мере для этих электронов, т.к. для них поверхность анода является магнитоизолированной. Для этих электронов численное определение  $B_{кр}$  соответствует расчёту по формуле (1) не смотря на неоднородность магнитного поля в промежутке между контактами, а также подтверждается функциональная зависимость  $(I \cdot W)_{кр} \sim \frac{1}{\Delta_2} \sqrt{U}$  в соответствии с (1).

В то же время эффект отсечки нарушается для электронов, эмитируемых периферийной частью контакта в область, где ослаблено радиальное магнитное поле и часть электронов может бомбардировать верхний контакт. Очевидно, требуется оптимизировать форму контактов для решения данной проблемы.

В табл.2 приведены данные расчёта критической величины ампер-витков индуктора  $(I \cdot W)_{кр}$  при разном количестве радиальных щелей в верхнем контакте (аноде). Как видно, величина  $(I \cdot W)_{кр}$  снижается при увеличении количества радиальных щелей, что можно объяснить более сильным проникновением импульсного магнитного поля индуктора в промежутке между контактами, в частности, за счёт снижения омических потерь в скин-слоях внутри радиальных щелей для вихревого тока, индуктированного в теле верхнего контакта.

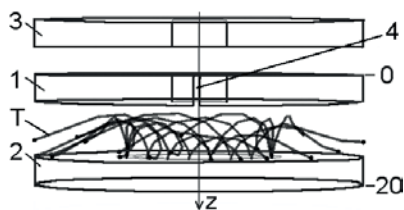


Рис. 7 Траектории электронов (Т) в режиме отсечки;  $f = 50$  кГц,  $U = 10$  кВ,  $I \cdot W = 1,5$  кА·вит. Траектории соответствуют амплитудному значению магнитного поля.

ТАБЛИЦА 2. ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ЩЕЛЕЙ В ВЕРХНЕМ КОНТАКТЕ НА  $(I \cdot W)_{кр}$

Количество щелей в верхнем контакте, $N$	$(I \cdot W)_{кр}$ , кА·вит
1	1,5
2	1,4
4	1,1
6	0,95
8	0,85

$f = 50$  кГц,  $U = 10$  кВ

## ВЫВОДЫ

Разработана новая физико-топологическая математическая модель плоского вакуумного диода с магнитным управлением на примере вакуумного выключателя с диодной структурой из плоских контактов и внешним индуктором в виде плоской спирали. Расчёты, выполненные с помощью модели, позволили определить распределение импульсного магнитного поля между контактами с учётом вихревых токов, индуктируемых в теле контактов, и траекторий электронов, эмитируемых контактом с отрицательным потенциалом. На модели исследованы условия реализации эффекта отсечки электронов в скрещенных полях для подавления рентгеновского излучения из выключателя, вызванного бомбардировкой положительного контакта электронами при высоком напряжении. Показана целесообразность применения под индуктором контакта с радиальными щелями в количестве не менее четырёх, чтобы снизить на десятки процентов критический ток индуктора. Для полной магнитной изоляции контактов от электронной бомбардировки требуется оптимизировать конструкцию контактов для устранения краевых эффектов; в частности, в дальнейшем целесообразно исследовать эффект отсечки в системе с электродами кольцевой формы, чтобы траектории автоэмиссионных электронов начинались в зоне действия радиального магнитного поля.

Разработанная модель также может применяться для анализа условий магнитного инициирования магнетронного разряда между плоскими электродами в газоразрядных приборах и источниках заряженных частиц, в которых используется отсечка электронов в скрещенных полях [6].

## ЛИТЕРАТУРА:

- [1] K. Shimoni, Fizicheskaya elektronika [Physical electronics], Moscow: Energiya, 1977, p. 608.
- [2] C. H. Flurscheim, Ed., Power Circuit Breaker: Theory and Design, vol. 17, Stevenage: Peter Peregrinus, 1975, p. 555. ISBN: 9780901223623
- [3] Y. A. Krasnyatov, E. V. Startseva, V. A. Lavrinovich and V. Y. Ushakov, «Vakuumnyy vyiklyuchatel toka [Vacuum Circuit Breaker]». Russian Federation Patent RU2400855C1, 27 September 2012.  
URL: <https://patents.google.com/patent/RU2400855C1/ru>
- [4] Y. Matsui and M. Shiozaki, "Large-capacity vacuum circuit breaker". USA Patent US8269586 B2, 18 September 2012.  
URL: <http://www.google.ch/patents/US8269586>



- [5] S. Kantas, "Winding for a contact of a medium-voltage vacuum circuit-breaker with improved arc extinction, and an associated circuit-breaker and vacuum circuit-breaker, such as an AC generator disconnector circuit-breaker". USA Patent US8835790 B2, 16 September 2014.  
URL: <https://www.google.tl/patents/US8835790>
- [6] A. I. Kuzmichev, *Magnetronnyie raspylitelnyie sistemyi* [Magnetron sputtering systems], Kyiv: Avers, 2008, p. 244. ISBN: 9668934075
- [7] A. I. Kuzmichev and L. Y. Tsybul'sky, «Termoemissionnyiy ionizator parov meallov [Thermoemission ionizer of metal vapor],» *Herald of Khmelnytskyi national university*, no. 6 (231), pp. 217-224, 2015.  
URL: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2015\\_6/\(231\)%202015-6-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2015_6/(231)%202015-6-t.pdf)
- [8] A. G. Godzhello and Y. K. Rozanov, Ed., *Elektricheskie i elektronnyie apparaty. T. 1 Elektromekhanicheskie ustroystva* [Electrical and electron apparatuses. Vol. 1 Electromechanical apparatuses], Moscow: Publ. Center "Academia", 2010, p. 352.
- [9] M. A. M., «Sovremennyye vakuurnyye vyklyuchatel [Modern vacuum breakers],» *News of Pskov State University. Ser. Engineering sciences*, no. 6, pp. 110-116, 2016.
- [10] E. Dong, T. Qin, Y. Wang, X. Duan and J. Zou, "Experimental Research on Speed Control of Vacuum Breaker," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 4, pp. 2594-2601, October 2013. DOI: [10.1109/TPWRD.2013.2264949](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2264949)
- [11] D. I. Ivanchenko and N. G. Novozhylov, "Vacuum breaker simulation for switching overvoltage study," in *Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, Tallinn, Estonia, 2016. DOI: [10.1109/PQ.2016.7724126](https://doi.org/10.1109/PQ.2016.7724126)
- [12] A. Nazaryichev, A. Surovov, V. Chayka and A. Tadzhibaev, «Perspektivy primeneniya vakuurnykh vyklyuchateley 110–220kV [Prospects for the use of vacuum circuit breakers 110–220kV],» 01 September 2010. [Internet]. Available: [http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy\\_primeneniya\\_vakuumnykh\\_vyklyuchatelej/](http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy_primeneniya_vakuumnykh_vyklyuchatelej/).
- [13] V. S. Nemkov and V. B. Demidovich, *Teoriya i raschyot ustroystv induktsionnogo nagreva* [Theory and calculation of induction heating devices], Moskva: Energiya, 1988, p. 280.

Надійшла до редакції 03 липня 2017 р.

УДК 621.385

## Дослідження відсічки електронів в плоскому діоді магнітним полем плоского індуктора

Майкут С. О., ORCID [0000-0002-0913-4190](https://orcid.org/0000-0002-0913-4190)

e-mail [s.maikuta@kpi.ua](mailto:s.maikuta@kpi.ua)

Дрозд І. М., ORCID [0000-0001-5152-1787](https://orcid.org/0000-0001-5152-1787)

e-mail [drozd@modem.com.ua](mailto:drozd@modem.com.ua)

Кузьмичев А. І., доц, к.т.н., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

e-mail [a.kuzmichev@kpi.ua](mailto:a.kuzmichev@kpi.ua)

Цибульський Л. Ю., доц, к.т.н., ORCID [0000-0002-7431-6417](https://orcid.org/0000-0002-7431-6417)

e-mail [meef@i.ua](mailto:meef@i.ua)

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна

**Реферат**—Досліджується ефект відсічення електронів у плоскому діоді магнітним полем зовнішнього плоского індуктора на прикладі вакуумних вимикачів (ВВ) з плоскими контактами. Ці прилади обрані для дослідження в зв'язку з їх великим попитом у сучасній високовольтній силовій електротехніці. Використання ефекту відсічення дозволяє придушити рентгенівське випромінювання з ВВ, що виникає при зближенні контактів, коли електрони автоемісії з негативного контакту бомбардують позитивний контакт. Дослідження виконані на фізико-топологічній моделі, за допомогою якої визначалися електричні та магнітні поля і враховувалося вторинне магнітне поле, що генерується вихровими струмами, індуктованими в контактах. Розраховувалися траєкторії електронів, визначалася критична величина струму індуктора, при якій електрони не досягали позитивного контакту і мав місце ефект відсічення. Дослідження показали доцільність впровадження радіальних щілин у контакт під індуктором в кількості не менше 4-х для зниження критичного струму індуктора на десятки відсотків. Виявлено порушення ефекту відсічення на краях контактів, де порушена ортогональність електричного і магнітного полів, і потрібна оптимізація конфігурації електродів. Розроблена модель також може застосовуватися для аналізу умов магнітного ініціювання магнетронного розряду між плоскими електродами в газорозрядних приладах і джерелах заряджених частинок.

Бібл. 13, рис. 7, табл. 2.



*Ключові слова* — відсічення електронів в магнітному полі; схрещені поля; імпульсний індуктор; вакуумний вимикач; рентгенівське випромінювання; фізико-топологічна модель.

UDC 621.385

## Investigation of electron cut-off in a planar diode by the magnetic field of a planar inductor

S. O. Maikut, ORCID [0000-0002-0913-4190](https://orcid.org/0000-0002-0913-4190)

e-mail [s.maikuta@kpi.ua](mailto:s.maikuta@kpi.ua)

I. M. Drozd, ORCID [0000-0001-5152-1787](https://orcid.org/0000-0001-5152-1787)

e-mail [drozd@modem.com.ua](mailto:drozd@modem.com.ua)

A. I. Kuzmychev, Assoc.Prof, PhD, ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

e-mail [a.kuzmichev@kpi.ua](mailto:a.kuzmichev@kpi.ua)

L. Yu. Tsybukyskiy, Assoc.Prof, PhD, ORCID [0000-0002-7431-6417](https://orcid.org/0000-0002-7431-6417)

e-mail [meef@i.ua](mailto:meef@i.ua)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—In this paper, the electron cutoff is investigated in a flat diode by the magnetic field of an external planar inductor, using vacuum switches (VS) with flat contacts as an example. The VS are chosen for research because of the high demand for these devices in modern high-voltage power engineering. They outperform the high-voltage circuit breakers with gas and oil insulation in terms of mass-dimension and operational parameters. However, it is necessary to suppress dangerous X-ray radiation from high-voltage VS, which is generated as a result of bombardment of contact with the positive potential by electrons accelerated by the voltage applied to the contacts. Free electrons are formed in the VS during their operation due to field emission, when the distance between the contacts decreases and the electric field strength increases greatly. To prevent electronic bombardment, the cutoff effect (blocking the electron current to the anode) is used, and for its creation a radial magnetic field of the inductor is used in the form of a flat spiral located on the inoperative side of one of the contacts. The crossed fields, the axial electric field and the radial magnetic field with induction which are greater than the critical value, strongly bend the trajectories of the electrons and prevent them from bombarding contact with the positive potential. Because of the difficulties of experimental investigation of this problem, it was performed on the VS model. For this purpose, a physical topological model of VS was developed, based on a self-consistent solution of the fundamental equations that determine the electric and magnetic fields between contacts, taking into account the geometry of VS, the conductivity of the contact material and the secondary magnetic field generated by the eddy currents induced in the contact, as well as the frequency of the pulsed supply of the inductor. Calculations were made of electron trajectories emitted by a contact with a negative potential, and for those electrons that do not reach the opposite contact, the critical current of the inductor is determined, depending on the geometric parameters and operational mode. When calculating the absence or presence of one or more radial slits in contact under the inductor was taken into account. VS with a split contact is recommended. Edge effects were found at the edges of the contacts, where the orthogonality of the electric and magnetic fields is disturbed, and therefore it is proposed further to optimize the configuration of the contacts. It was suggested that the radial magnetic field of a flat inductor would be useful for cutting off electrons during the deionization of a vacuum arc plasma during the opening of contacts and for reducing the thermal effect of bombarding electrons on a positive contact. The developed model can also be used to analyse the conditions for magnetic initiation of a magnetron discharge between plane electrodes in gas discharge devices and sources of charged particles.

Ref. 13, fig. 7, tabl. 2.

**Key words** — electron cut-off in magnetic field; crossed fields; pulsed inductor; vacuum switch; vacuum breaker; X-rays; physical topological model.

