

Моделювання магнітного відсічення електронів у вакуумному комутаторі з анодом у вигляді індуктора

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

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

Шинкаренко В. Г., ORCID [0000-0002-0916-6424](https://orcid.org/0000-0002-0916-6424)

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

Кузмичев^s А. І., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» ROR [00syn5v21](https://orcid.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Анотація—Проведено моделювання процесу магнітного відсічення електронів у вакуумному комутаторі з анодом у вигляді індуктора. Розрахунки виконувалися за алгоритмом відповідно до фізико-топологічної моделі фізичних процесів у вакуумному комутаторі, яка враховувала розподіл струмів в аноді, розподіл індукції магнітного поля, розподіл напруженості електричного поля у вакуумному комутаторі, траєкторію електронів, емітованих катодом та умови переривання струму. Визначення розподілу струму в аноді, конфігурації електричного і магнітного полів проводилося за математичною моделлю, заснованою на рівняннях Максвелла для вакууму і електропровідного матеріалу анода і граничних умовах, адаптованих до форми елементів електродів. Для визначеності використовувалися також матеріальні рівняння.

Отримані результати можуть використовуватися при розробці конструкції вакуумного комутатора з перериванням струму вакуумно-дугового розряду.

Ключові слова — вакуумний комутатор; комп'ютерне моделювання; фізико-топологічне моделювання електронного пристрою; рівняння Максвелла; магнітне відсічення електронів; математична модель; трасування траєкторії електронів.

І. ВСТУП

Вакуумні комутатори в даній роботі – це прилади, провідність яких забезпечується ініціюванням на період пропускання струму так званої вакуумної дуги, тобто низьковольтного потужного електричного розряду в парах матеріалу катода. У паузах між імпульсами струму в приладах підтримується високий вакуум і вони мають високу електричну міцність внаслідок конденсації пари на внутрішніх поверхнях. Вакуумні комутатори використовуються для включення і переривання струму в ланцюгах високовольтних імпульсних генераторів і захисту електро- та радіосистем від короткого замикання при аварійних електричних пробоях [1]–[3]. Їх розробка є актуальним завданням вакуумної та плазмової електроніки, тому що такі прилади вкрай необхідні для високовольтних електрофізичних систем і потужної радіоелектронної та лазерної техніки [1]–[3].

Для швидкого переривання струму також використовуються вакуумні лампи та напівпровідникові прилади, але недоліком вакуумних ламп є велике падіння напруги на них, а напівпровідникові комутатори розраховані на невисоку напругу. На вакуумному комутаторі, який працює на дуговому розряді

в парах матеріалу катода, падає мала напруга, близько 10÷30 В, тобто така ж напруга, як на приладах напівпровідникової електроніки. При цьому комутовані струми можуть становити десятки кілоампер при напрузі до сотні кіловольт.

Ефективність вакуумного комутатора визначається, багато в чому, характеристиками управління та надійного гасіння вакуумної дуги. Один із способів переривання дуги заснований на генерації в проміжку між електродами імпульсного магнітного поля, поперечного до електричного поля [3], [4]. Причому індукція магнітного поля повинна бути достатньою для різкого зростання імпедансу замагніченої плазми в дуговому розряді, а падіння напруги на дузі має сягати рівня напруги джерела живлення. Дослідження підтвердили практичну ефективність імпульсного магнітного способу управління розрядом [4]. Однак фізичні процеси гасіння дуги в вакуумному комутаторі ще не до кінця досліджені, в тому числі процеси, які можуть призводити до повторного запалювання дуги в період деіонізації плазми і конденсації пари в умовах наростання напруги на електродах [4].



Мета даної роботи — комп'ютерне моделювання вакуумного комутатора з анодом у вигляді індуктора та дослідження впливу конструкції та електричних режимів на процес магнітного відсічення катодних електронів від анода. Процес відсічення дуже важливий для заключного етапу переривання струму. Відсічення електронів ускладнене залишковою термомісією з катода і вторинною γ -емісією при бомбардуванні катода залишковими іонами.

У даній роботі дослідження процесу відсічення електронів проведено на основі фізико-топологічної моделі вакуумного комутатора з анодом у вигляді трохвиткового індуктора з плоско-спіральною формою витків. При цьому для створення магнітного поля використовується імпульсний струм, який пропускається через анод-індуктор. Імпульс струму має форму позитивної арки пів-синусоїди. Такий підхід дозволяє ефективно генерувати магнітне поле, максимально наближене до поверхні анода і до потоку електронів [5].

Слід відмітити, що плоскі індукційні котушки застосовуються в технології індукційного нагріву [6], [7], але їм притаманний недолік, що полягає в тому, що вони створюють вкрай нерівномірний магнітний потік, який швидко спадає за величиною в міру віддалення від поверхні витків. Це призводить до низької швидкості нагріву деталей під індуктором і низької енергоефективності. Але це недолік тільки для технології індукційного нагрівання, бо в нашому випадку локалізація магнітного поля біля поверхні анодного індуктора є корисною властивістю для вирішення іншої задачі – замагнічення, тобто відсічення електронів, недопущення їх до поверхні анода. Проте, виходячи з вищесказаного, зроблене припущення повинно бути апробовано. Найбільш ефективним у випадку складних конструкцій і фізичних процесів є математичне фізико-топологічне моделювання, яке широко використовується в електроніці, як різновид імітаційного моделювання, і яке проведено в даному дослідженні

II. КОНСТРУКЦІЯ ВАКУУМНОГО КОМУТАТОРА

Розміри електродів досліджуваної конструкції вакуумного комутатора, які необхідні для розрахунків, представлені на Рис. 1, де: 1 – анод, 2 – катод. Анод має форму конічної спіралі у яку закручена полоса шириною 21 мм і товщиною 3 мм. Анод використовується у якості індуктора, який створює магнітне поле при пропусканні по ньому імпульсу струму. Поверхня нижнього витка анода-індуктора служить колектором електронів.

Конічна вершина катода зазвичай служить поверхнею, яка ефективно емітує електрони. Діаметр катода вибрано рівним 5 мм.

Відзначимо, що в роботі фактично моделюються процес магнітного відсічення електронів саме від нижньої поверхні анода.

Нижній виток анода одночасно захищає інші витки від запылення металевим конденсатом матеріалу катода, який випаровується. Така конструкція

дозволяє не вводити додатковий електрод (індуктор) в конструкцію вакуумного комутатора.

III. ФІЗИКО-ТОПОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАКУУМНОГО КОМУТАТОРА

Для дослідження процесу магнітного відсічення катодних електронів від анода у вакуумному комутаторі проводилися розрахунки:

- розподілу струмів в аноді;
- розподілу магнітного поля;
- розподілу електричного поля;
- траєкторій електронів, емітованих катодом;
- умови відсічення електронів.

Розрахунок параметрів та характеристик процесів у вакуумному комутаторі реалізований згідно структурно-алгоритмічної схеми фізико-топологічної моделі, яка представлена на Рис. 2 [4]. Вона включає моделі електричного поля між анодом і катодом, магнітного поля струму індуктора, модель емісії електронів з поверхні катода і кінетичну модель руху електронів в електромагнітному полі вакуумного комутатора. Кожна з вказаних фізичних моделей будується на строгому математичному описанні досліджуваних процесів. Дослідження виконані послідовним чисельним розрахунком методом скінченних елементів параметрів та характеристик процесів за вказаними на Рис. 2 моделями [8].

Розрахунок за фізико-топологічною моделлю також враховує геометричні розміри електродів вакуумного комутатора, емісійні, електричні і магнітні властивості матеріалів, напругу на електродах, струм анода.

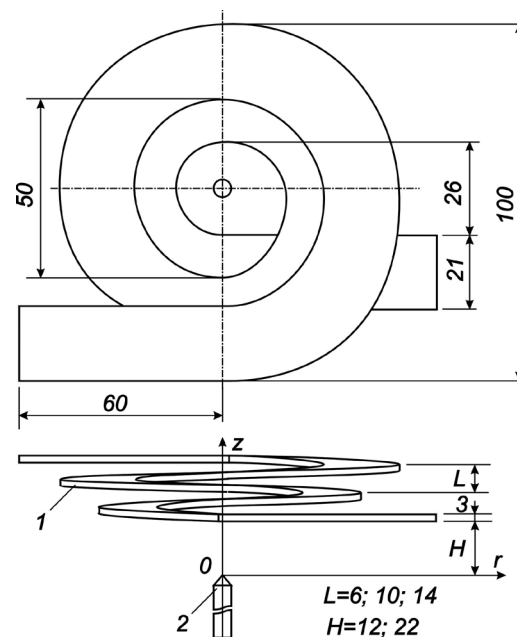


Рис. 1 Електроди вакуумного комутатора: 1 – анод-індуктор, 2 – катод

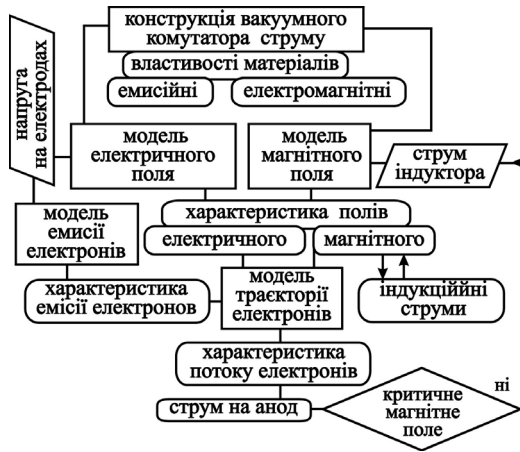


Рис. 2 Структурно-алгоритмічна схема фізико-топологічної моделі розрахунку параметрів вакуумного комутатора з анодом-індуктором

У якості характеристики потоку електронів в дослідженні враховувалася частка електронів, які були відсічені магнітним полем від анода-індуктора. Повне відсічення електронів приймалося за критерій оптимальної конструкції для заданого режиму роботи.

IV. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ У ВАКУУМНОМУ КОМУТАТОРІ

Визначення розподілу струму в аноді, конфігурації електричного і магнітного полів проводилося за математичною моделлю, заснованою на рівняннях Максвелла для вакууму і провідного середовища анода та граничних умовах, адаптованих до форми електродів вакуумного комутатора [9],

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

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

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

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

де ∇ – оператор Пуассона, \mathbf{H} – напруженість магнітного поля (А/м), \mathbf{J} – щільність електричного струму (А/м²), \mathbf{D} – індукція електричного поля (Кл/м²), t – час (с), \mathbf{E} – напруженість електричного поля (В/м), \mathbf{B} – індукція магнітного поля (Тл), ρ – щільність електричного заряду (Кл/м³), σ – електропровідність (См/м).

При розрахунках в рівнянні (1) член $\partial \mathbf{D} / \partial t$ не враховувався внаслідок низьких робочих частот живлення індуктора (менше 1 МГц), а в рівнянні (3) не враховувався просторовий заряд через його незначну роль при високій напрузі, яка застосовується у вакуумному комутаторі.

Окрім системи рівнянь (1)-(4) використовувалися матеріальні рівняння:

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

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

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

де ϵ_0 – електрична постійна, μ_0 – магнітна проникність вакууму і σ – електрична провідність матеріалу анода (мідь). Вектор поляризації \mathbf{P} і магнітний вектор \mathbf{M} приймалися рівними нулю.

При вирішенні системи рівнянь Максвелла застосовувалися загальноприйняті граничні умови [10].

Початкова кінетична енергія електронів, емітованих з поверхні катода, задавалася рівною нулю. Напрямок вильоту з поверхні визначався напрямком силових ліній електричного поля біля поверхні. Емісія електронів задавалася рівномірним розподілом точок емісії по поверхні вістря катода.

Модель траєкторії електронів в електричному і магнітному полях у вакуумному комутаторі заснована на другому законі Ньютона під дією сили Лоренца (\mathbf{F}):

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

де e і \mathbf{v} – заряд і швидкість електрона відповідно. Розрахунок траєкторій руху електронів по цій моделі проводився з урахуванням диференціальних параметрів попередньо обчислених електричного і магнітного полів. Сила, що діє на електрон, визначалася за значенням векторів \mathbf{E} , \mathbf{B} і \mathbf{v} в точці простору знаходження електрона. Потім за законом Ньютона визначалося переміщення електрона в наступну точку, де розрахунок повторювався. Дискретизація розрахунку траєкторії і структура полів оптимізувалися по математичним алгоритмам методу скінченних елементів [8].

Розрахунок траєкторій виконувався в квазістаціонарному наближенні, тобто при нехтуванні змінами полів за час прольоту електронів між електродами.

Відомо, що при певних напруженостях електричного і магнітного полів електрони не можуть досягти анода під дією сили Лоренца, яка відхиляє електрони від напрямку дії силової лінії електричного поля. Для цього індукція магнітного поля B повинна бути більше деякої критичної величини $B_{кр}$ [4].

Система параметрів досліджуваної моделі вакуумного комутатора наведена у Таблиця 1.

ТАБЛИЦЯ 1 СИСТЕМА ПАРАМЕТРІВ ВАКУУМНОГО КОМУТАТОРА

Параметр	Величина
Тривалість імпульсу	5 мкс
Струм індуктора	600 – 900 А
Товщина витка	3 мм
Крок витка індуктора	6 – 14 мм
Відстань анод-катод	12 – 22 мм
Діаметр катода	5 мм
Напряга анод-катод	10 кВ



В розрахунках задавався імпульс струму анода-індуктора у формі позитивної арки пів-синусоїди тривалістю 5 мкс (100 кГц). При цьому емісія електронів відбувалася у момент досягнення синусоїдою амплітудного значення, тобто через 2,5 мкс після початку імпульсу.

V. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На Рис. 3 показано розподіл електричного поля у вигляді еквіпотенціалів ϕ між електродами вакуумного комутатора. Симетрія поля в області анода-індуктора порушується внаслідок несиметричної геометрії анода.

Розподіл індукції магнітного поля уздовж осі анода-індуктора, починаючи з вістря катода, при двох амплітудах імпульсу струму анода представлено на Рис. 4. Розподіли подібні, бо структура магнітного поля не залежить від амплітудного значення струму, а визначається лише конструкцією електродів. Розрахунок структури магнітного поля виконувався з урахуванням вторинних магнітних полів, які наводяться у витках індуктора його ж струмом – самоіндукція. Розрахунок враховував розподіл струму в перетині індуктора, який викликаний скін-ефектом.

Отримані розподіли електричного та магнітного полів дозволяють визначити траєкторію електронів в просторі, який охоплює анод-індуктор. При розрахунку траєкторії (трасування) заряд електрона округлявся до $1,6 \times 10^{-19}$ Кл і маса – до $9,1 \times 10^{-31}$ кг. Траєкторії розраховувалися для 300 частинок, рівномірно емітованих з конічної вершини катода. Для наочності на Рис. 5, Рис. 6 і Рис. 7 показані 30 траєкторій частинок.

На Рис. 5 показані траєкторії електронів у вакуумному комутаторі після однієї наносекунди (10^{-9} с) переміщення при амплітудному значенні імпульсу струму індуктора величиною 900 А. Відстань катод-анод – 22 мм. Аналіз траєкторії електронів на Рис. 5 показує, що крок спіралі істотно не впливає на фокусування електронів.

На Рис. 6 представлені траєкторії електронів у вакуумному комутаторі при імпульсі струму індуктора 900 А і відстані катод-анод – 12 мм. Порівняння траєкторій електронів на Рис. 5 та Рис. 6 свідчить, що відстань від катода до анода істотно впливає на фокусування електронів, тобто на ефективність відсікання електронів від анода. Електрони, розсіяні в область катода (на рисунках – вниз), по закінченню імпульсу струму індуктора мають ймовірність повернутися на анод. Тому, фокусування електронів над анодом є задачею дослідження впливу конструктивних параметрів вакуумного комутатора на ефективність фокусування електронів.

На Рис. 7 наведено траєкторії електронів при відстані анод-катод 12 мм і амплітуді імпульсу струму індуктора 600 А (крок спіралі 10 мм).

Порівняння траєкторій електронів на Рис. 6б і Рис. 7, для яких відмінна тільки амплітуда імпульсу струму індуктора (900 А і 600 А відповідно), дозволяє визначити достатній струм ефективного відсікання

електронів для обраної конструкції. При імпульсі струму в 600 А тривалістю 1 нс 30% електронів (9 з 30) не сфокусовані за анодом (див. Рис. 7), а при 900 А – тільки 1 (див. Рис. 6, б).

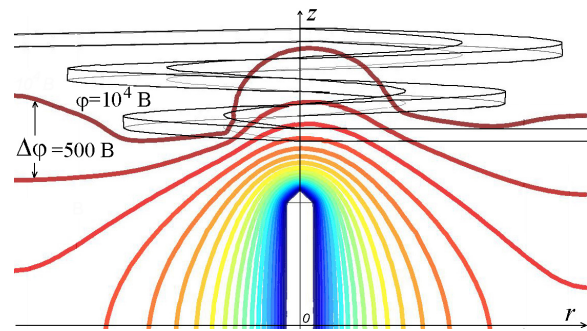


Рис. 3 Розподіл електричного поля в осьовому перерізі з кроком еквіпотенціалів 500 В

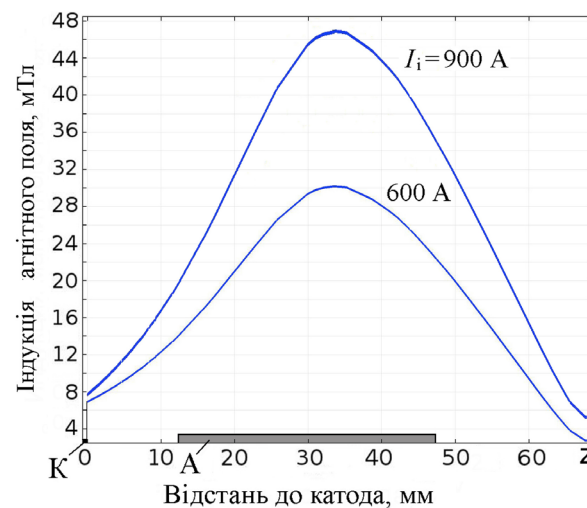
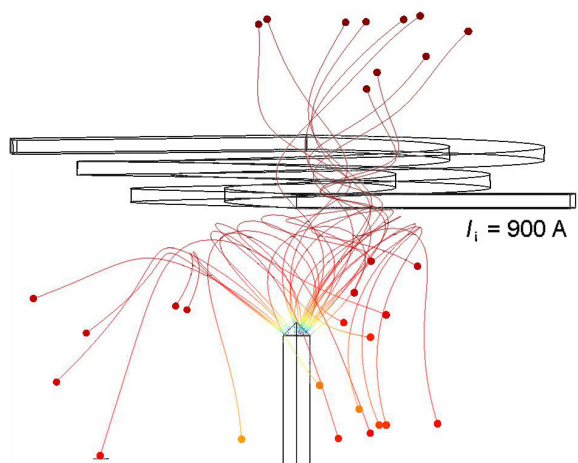


Рис. 4 Розподіл індукції магнітного поля на осі анода-індуктора (K – вістря катода, A – область анода).

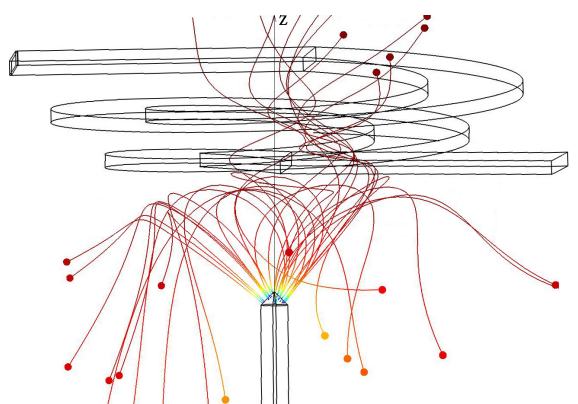
На графіках Рис. 8 зведено результати розрахунків частки відсічених від анода електронів у вакуумному комутаторі в залежності від амплітуди імпульсу струму індуктора при різному кроці витків індуктора L і відстані катод-анод $H=12$ мм і $H=22$ мм. Частка розраховувалася як відношення кількості відсічених до 300 – кількості електронів, для яких розраховувалися траєкторії.

Зменшення кроку витків індуктора і збільшення амплітуди імпульсу струму в ньому призводить до збільшення напруженості магнітного поля в області катода, що покращує фокусування електронів. При кроці витків індуктора 6 мм і амплітуді імпульсу струму 900 А всі емітовані з катода електрони фокусуються за межі анода. Сфокусовані електрони слід направляти на додатковий конструктивний електрод (колектор) і бажано застосувати режим живлення колектора з рекуперацією енергії електронного потоку при виборі оптимальних режимів роботи вакуумного комутатора.

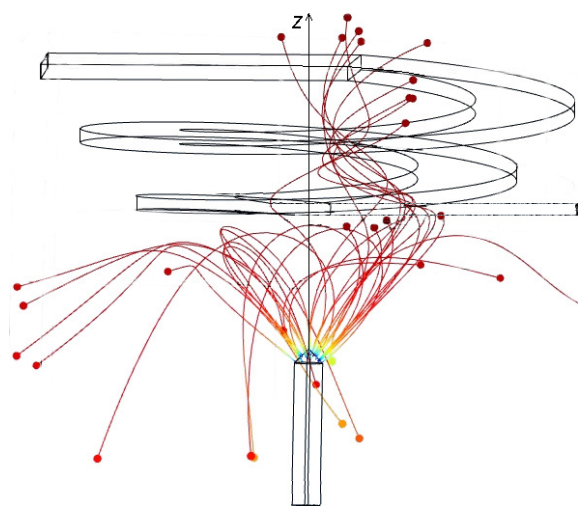




а)

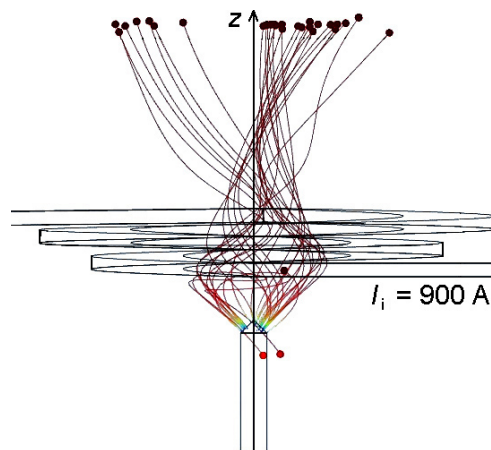


б)

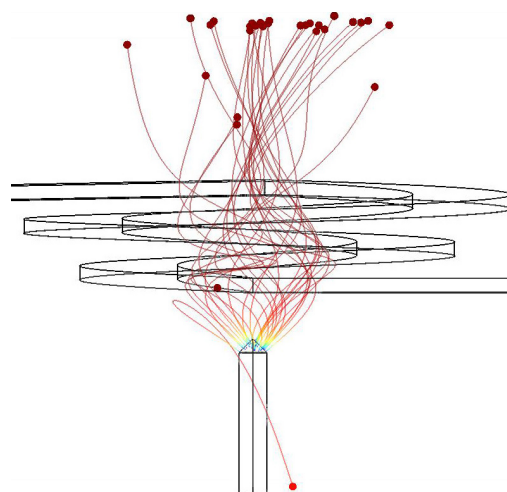


в)

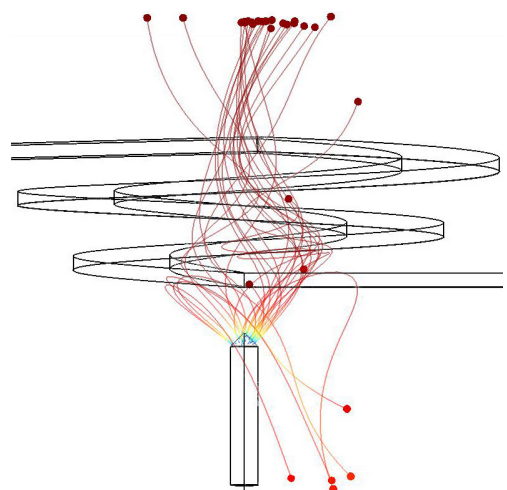
Рис. 5 Траекторії електронів при відстані катод-анод $H=22 \text{ мм}$ і різних кроках витків анода-індуктора L : а – 6 мм; б – 10 мм; в – 14 мм. Амплітуда імпульсу струму 900 А



а)



б)



в)

Рис. 6 Траекторії електронів при відстані катод-анод $H=12 \text{ мм}$ і різних кроках витків анода-індуктора L : а – 6 мм; б – 10 мм; в – 14 мм. Амплітуда імпульсу струму 600 А



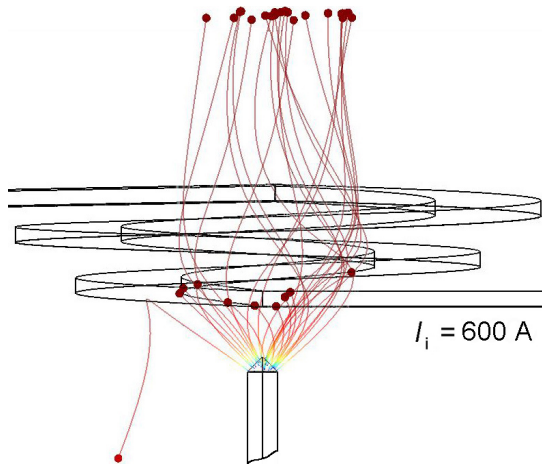


Рис. 7 Траєкторії електронів в ВК при відстані катод-анод 12 мм

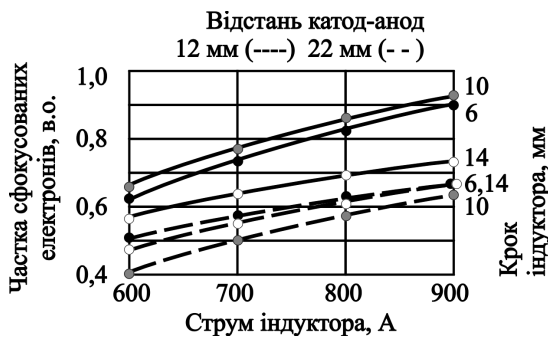


Рис. 8 Залежність частки сфокусованих електронів від струму індуктора

Треба враховувати, що зменшення кроку витків індуктора обмежена можливістю виникнення між витками різниці потенціалів достатньої для виникнення електричного пробоя між витками. Оптимальний крок витків індуктора повинен з'ясуватися в окремому дослідженні.

Розрахунки також показали, що при відстані катод-анод нижче 12 мм фокусування електронів погіршується.

ВИСНОВКИ

Виконано фізико-топологічне моделювання процесу магнітного відсічення електронів від анода виконаного у формі індуктора. Визначено вплив конструктивних параметрів на ефективність відсічення електронів. Для досліджуваної конструкції (див. Рис. 1) оптимальна відстань катод-анод склала 12 мм при кроці між витками індуктора 6 мм. Результати розрахунків показали, що зниження відстані між витками індуктора підвищує ефективність відсічення електронів, що підтверджує фізичну адекватність математичної моделі і правильність розрахунків.

Надійшла до редакції 24 липня 2020 р.

Розрахунок структури магнітного поля виконувався з урахуванням вторинних магнітних полів і розподілу струму в перетині індуктора, який викликаний скін-ефектом.

У запропонованій конструкції вакуумного комутатора з анодом-індуктором з трьома витками час прольоту електронів через електродну систему при напрузі анод-катод 10 кВ складає порядку 1 нс при імпульсі струму індуктора – 900 А, тобто надто малу частку імпульсу струму анода-індуктора тривалістю 5 мкс. Оскільки імпульс струму індуктора має форму позитивної арки пів-синусоїди треба встановити, в яку частку імпульсу забезпечується відсічення електронів. Застосоване фізико-топологічне моделювання дозволяє це зробити. Тривалість імпульсу індуктора повинна узгоджуватися з тривалістю процесу конденсації залишкової пари матеріалу катода і тривалістю залишкової термоелектронної емісії та вторинної γ -емісії катода.

Отримані результати можуть використовуватися при розробці конструкції вакуумного комутатора з перериванням струму вакуумно-дугового розряду.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] J. Lehr and P. Ron, *Foundations of Pulsed Power Technology*. Wiley-IEEE Press, 2017, ISBN: 978-1-118-62839-3.
- [2] E. Godzhello and Y. Rozanov, *Elektricheskie i elektronnye apparaty. T. 1 Elektromekhanicheskie ustroystva [Electrical and electron apparatuses. Vol. 1 Electromechanical apparatuses]*. Moscow: Publ. Center "Academia," 2010.
- [3] A. Markov, "Modern vacuum breakers," *News Pskov State Univ. Ser. Tech. Sci.*, no. 6, pp. 110–116, 2016.
- [4] S. Maikut, I. Drozd, A. Kuzmychev, and Y. Tsybukyski, "Issledovaniye otsechki elektronov v ploskom diode magnitnym polem ploskogo induktora [Investigation of electron cut-off in a planar diode by the magnetic field of a planar inductor]," *ElectronCommun*, vol. 22, no. 4, pp. 21–27, 2017, DOI: [10.20535/2312-1807.2017.22.4.105967](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.4.105967).
- [5] A. Eroglu, "Planar inductor design for high power applications," *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 35, no. 35, pp. 53–67, 2011, DOI: [10.2528/pierb11081601](https://doi.org/10.2528/pierb11081601).
- [6] V. Kilic, E. Unal, and H. Demir, "Coupling and power transfer efficiency enhancement of modular and array of planar coils using in-plane ring-shaped inner ferrites for inductive heating applications," *J. Appl. Phys.*, vol. 1, no. 122, pp. 83–88, 2017, DOI: [10.1063/1.4992119](https://doi.org/10.1063/1.4992119).
- [7] N. Barka, "Study of the machine parameters effects on the case depths of 4340 spur gear heated by induction - 2D model," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, no. 93, pp. 1173–1181, 2017, DOI: [10.1007/s00170-017-0586-5](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0586-5).
- [8] A. S. Ilyinsky, V. V. Kravtsov, and A. G. Sveshnikov, *Mathematical Models of Electrodynamics [Matematicheskiye modeli elektrodinamiki]*. Moscow: High school, 1991, ISBN: 5-06-001950-0.
- [9] R. Mitra, *Vychislitel'nyye metody v elektrodinamike [Computational methods in electrodynamics]*. Moscow: World, 1977.
- [10] V. V. Batyhyn and Y. . Toptyhyn, *Sbornik zadach po elektrodinamike [Collection of problems in electrodynamics]*. Moscow: SIC, 2002, ISBN: 5-93972-155-9.



Simulation of Magnetic Electron Cut-off in a Vacuum Switch with an Anode in the Form of an Inductor

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

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

V. H. Shynkarenko, ORCID [0000-0002-0916-6424](https://orcid.org/0000-0002-0916-6424)

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

A. I. Kuzmychev^s, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)
Kyiv, Ukraine

Abstract—The simulation of the process of magnetic cut-off of electrons in a vacuum switch (VC) with an anode in the form of an inductor was performed. Calculations were performed according to the physico-topological model of physical processes in the vacuum switch, which took into account current distribution along electrodes, the trajectory of electrons emitted by the cathode and the conditions of current interruption in VC. Determination of current distribution along the anode, as well as configurations of electric and magnetic fields were performed according to a mathematical model based on Maxwell's equations for vacuum and conductive medium of the anode and boundary conditions adapted to the shape of the elements of the VC. Material equations were also used for certainty. The initial kinetic energy of electrons emitted from the cathode was set equal to zero. Their direction of departure from the cathode surface was determined by the direction of the lines of force of the electric field near the surface. Electron emission was given by the uniform distribution of emission points on the surface of the cathode tip. The calculation of the structure of the magnetic field was performed taking into account the secondary magnetic fields and the current distribution over the cross section of the anode inductor, which is caused by the skin effect.

It is established that a decrease in the step of the inductor turns and an increase in the amplitude of the current pulse in it lead to an increase in the magnetic field strength in the cathode region, which improves the focusing of electrons. At anode-cathode voltage of 10 kV, the step of the inductor of 6 mm and the amplitude of the anode inductor current pulse of 900 A, all the electrons emitted from the cathode are focused outside the anode.

The influence of design parameters on the electron cut-off efficiency is determined. For the investigated design, the optimal cathode-anode distance was 12 mm with a step between the turns of the inductor of 6 mm. The results of calculations showed that reducing the distance between the turns of the inductor increases the efficiency of electron cut-off, which confirms the physical adequacy of the mathematical model and the correctness of the calculations. Calculations also showed that at a cathode-anode distance below 12 mm, the focusing of electrons deteriorates.

In the proposed design of the VC with the anode inductor in the form of three turns, the complete cut-off of electrons, i.e. the time of flight of electrons through the electrode system, at anode-cathode voltage of 10 kV, occurred by less than 1 ns at an inductor current pulse of 900 A. The inductor current pulse duration was 5 μ s had the form of the half-sinusoid arc. The used method of modeling allows to establish in what part of the inductor pulse the full cut-off of electrons is provided.

The obtained results can be used in the development of the VC with interruption of the current of vacuum-arc discharge.

Keywords — vacuum switch; computer modeling; physical and topological modeling of an electronic device; Maxwell's equations; magnetic cut-off of electrons; mathematical model; tracing of the trajectory of electrons.

