

УДК 621.385

Модельовання відсічки електронів в вимикачі струму магнітним полем індуктора

Майкут С.О., Дрозд І.М., к.т.н., доц. Кузьмічев А.І.,
 к.т.н., доц. Цибульський Л.Ю.

Використання індукційних вимикачів струму дозволяє проводити роз'єднання електричного кола за 1-2 мікросекунди при робочих напругах 1-10 кВ та струму до 2 кА. Робота вимикача струму базується на керуванні траєкторіями електронів та іонів у вакуумно-дуговому розряді. Використовується роз'єднання потоку електронів та іонів між катодом і анодом за допомогою наведеного магнітного поля, яке генерується, наприклад, соленоїдом, що перебуває назовні вакуумного приладу.

Існує декілька варіантів використання вимикачів струму: по-перше, у якості запобіжника високої швидкодії; по-друге, у якості буфера шунтування.

Вагомою перевагою газорозрядного вимикача струму є можливість роботи у середовищі з високим рентгенівським випромінюванням (АЕС, космос).

Фізичні процеси, що протікають у приладі, носять назву «критичний режим», коли магнітне поле у схрещеному електромагнітному полі на стільки велике, що висота циклоїдальної траєкторії електрона

стає меншою, ніж пряма відстань катод-анод. (Рис.1) [1].

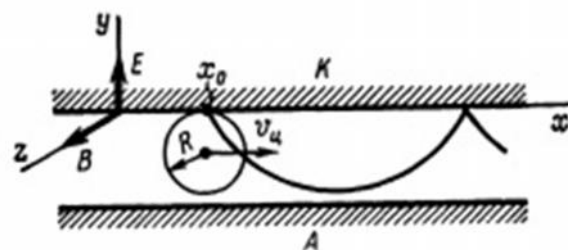


Рис. 1. Циклоїдний рух електрона в схрещених полях. Електрон входить в простір взаємодії в точці O з нульовою початковою швидкістю

Сила Лоренца F , що діє на електрон в магнітному полі (1)

$$F = -q \{ \text{rot} A \times v \} + \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1)$$

де q – величина заряду, $\text{rot} A$ – ротор векторного потенціалу, v – швидкість руху заряду.

Рівняння, яке описує рух електрона в схрещеному електромагнітному полі

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = -e \{ E + [vB] \} \quad (2)$$

де m – маса електрона (частинки),
 \mathbf{V} – вектор магнітної індукції, e –
 заряд електрона

Радіус траєкторії електрона в
 магнітному полі в умовно
 необмеженому просторі між анодом та
 катодом

$$R = \frac{mV}{eB^2} \quad (3)$$

Період обертання електрона

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega_{\text{ц}}} = \frac{2\pi \cdot m}{eB}, \quad (4)$$

де $\omega_{\text{ц}}$ – циклотронна частота.

Траєкторії електронів при $B = 0$
 нормальні до поверхонь анода і
 катода. При відстані між анодом та
 катодом $d = 2R$ електрони лише
 торкаються анода в вершині циклоїди.
 При $d > 2R$ електрони, не доходячи до
 анода (див. рис.1), рухаються по
 циклоїдним траєкторіям. При цьому
 конвекційний струм на анод I_a різко
 падає, як показано на Рис. 2.
 Відповідна величина магнітної
 індукції в зазорі називається
 критичною індукцією $B_{\text{кр}}$. Кінцеву
 швидкість спаду струму поблизу
 точки $B = B_{\text{кр}}$ і наявність невеликого
 струму $I_a \neq 0$ при $B > B_{\text{кр}}$ пояснюється
 дифузією електронів на анод в
 результаті зіткнень з молекулами
 залишкових газів, початковими
 тепловими швидкостями електронів і
 коливаннями, що спонтанно
 виникають в електронній хмарі
 магнетрона. Деяку роль відіграють
 також відхилення форми електродів
 від симетрії, вплив обмеженості

областей, і наявність щілин в поверхні
 анода.

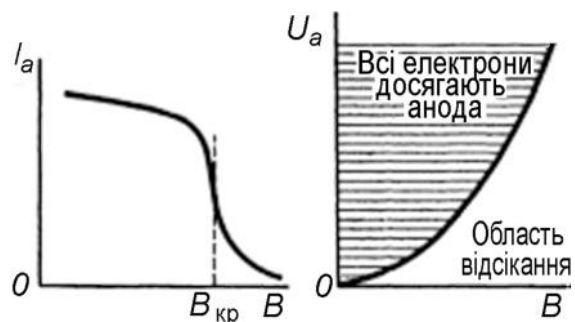


Рис. 2. Залежність анодного струму в
 робочому просторі від індукції
 магнітного поля в статичному
 режимі при сталій напрузі анода
 (а) та парабола критичного
 режиму (б) [2]

Критичне магнітне поле, при
 якому в статичному режимі
 припиняється анодний струм плоского
 діода, визначається при заданій
 анодній напрузі $U_a = const$

$$B_{\text{кр}} = d = 2R; E = \frac{U_a}{d} \quad (5)$$

Звідки

$$B_{\text{кр}} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{2m}{e}} U_a \quad (6)$$

Формули для циліндричних
 електродів (див. рис.1)

$$B_{\text{кр}} = \frac{\sqrt{\frac{8m}{e}} U_a}{r_a \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)} \quad (7)$$

$$B_{\text{кр}} = \frac{6.75 \sqrt{U_a}}{r_a \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)} * 10^{-4} [\text{мл}] \quad (8)$$

де r_a і r – радіуси анода і катода, відповідно.

При малих розмірах катода вираз (8) спрощується

$$V_{кр} \approx \frac{1}{R_a} \sqrt{\frac{8m}{e}} U \quad (9)$$

де R_a – радіус анода.

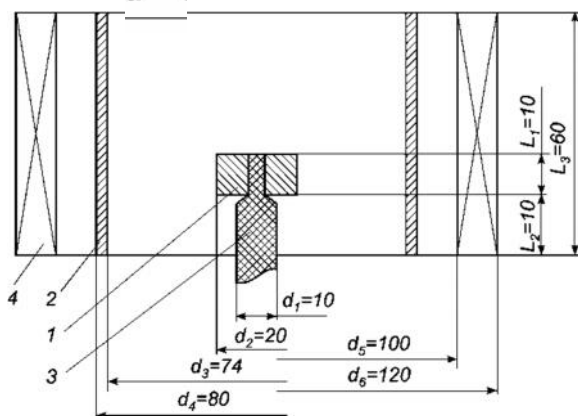


Рис. 3. Конструкція пристрою: 1 – катод, 2 – анод, 3 – тримач, 4 – індуктор

Для простору з внутрішнім анодом [3].

$$V_{кр} \approx \frac{r_a}{R_k^2} \sqrt{\frac{8m}{e}} U \quad (10)$$

Наведені вище вирази (5) - (10) дозволяють проводити розрахунки для ідеалізованих конструкцій. Для валідації та верифікації їх у реальних приладах необхідно провести фізико-топологічне моделювання приладу та чисельний розрахунок його параметрів. А результати моделювання порівняти з розрахунками за виразом (7).

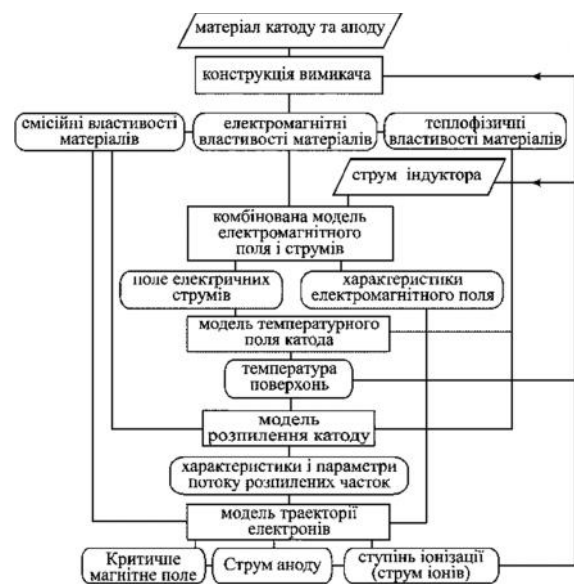


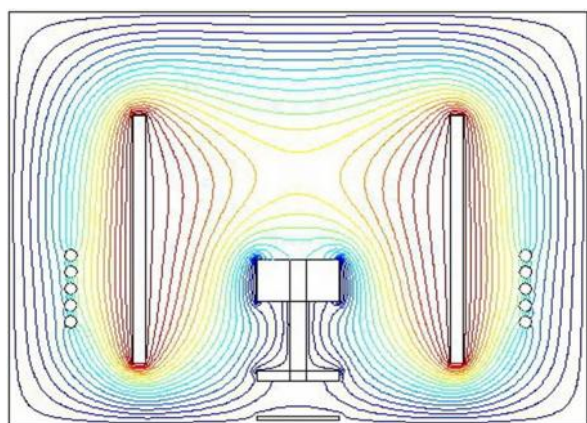
Рис. 4. Ієрархічна структура фізико-топологічної моделі індукційного вимикача струму

На Рис. 4 наведено ієрархічну структуру фізико-топологічної моделі індукційного вимикача струму, в якій послідовно проводиться чисельний розрахунок електростатичних та магнітних полів, траєкторії електронів та іонів та параметрів приладу.

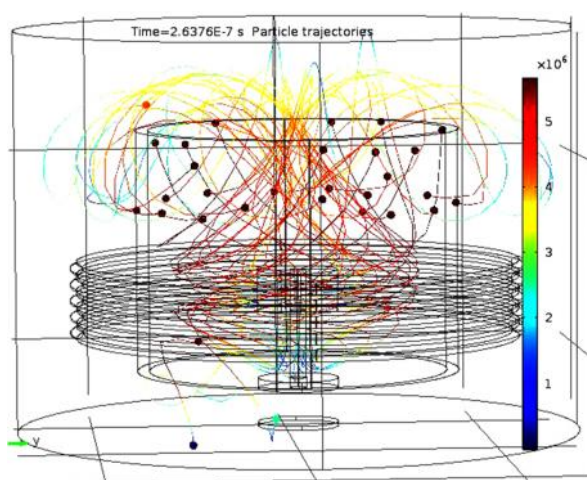
На рис.5 та рис.6 наведено результати розрахунків структури електричного поля та траєкторії електронів у індукційному вимикачі струму.

На аноді задавалася напруга $U_a = 1$ кВ.

На Рис. 5 наведено результати розрахунку для випадку заземлених стінок приладу (межі області обчислень). В цьому випадку електрони через наявність крайового ефекту потрапляють на зовнішню сторону аноду.

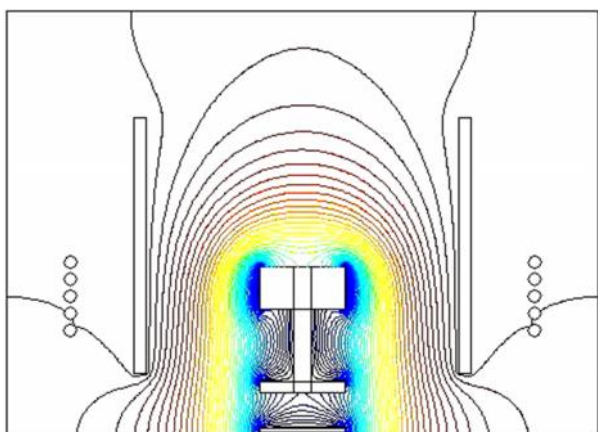


а)

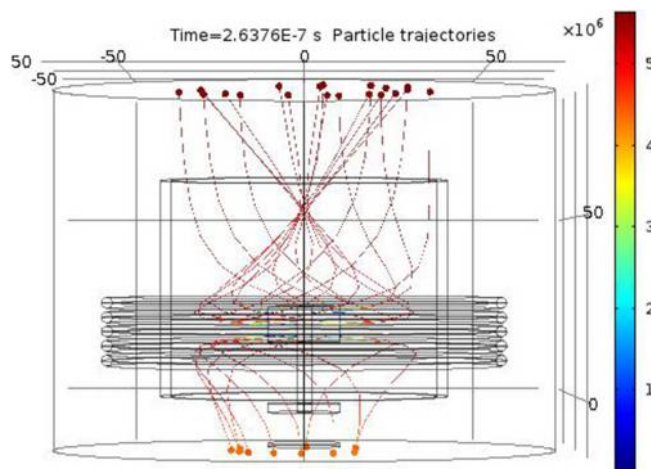


б)

Рис. 5. Еквіпотенціали електричного поля (крок 50 В) (а) в індукційному вимикачі струму та траєкторії електронів (б) у випадку заземлених стінок корпусу



а)



б)

Рис. 6. Еквіпотенціали електричного поля (крок 50 В) (а) в індукційному вимикачі струму та траєкторії електронів (б) у випадку ізолюваних стінок корпусу

У випадку ізолюваних стінок приладу (Рис. 6) електрони не потрапляють на анод.

Фізико-топологічне моделювання індукційного вимикача струму дозволяє виявити всі можливі недоліки, що можуть негативно впливати на роботу даного приладу, встановити параметри та провести оптимізацію.

На Рис. 7 наведено графік залежності критичного магнітного поля у поверхні катоду від напруги на аноді отриманий за виразом (7).

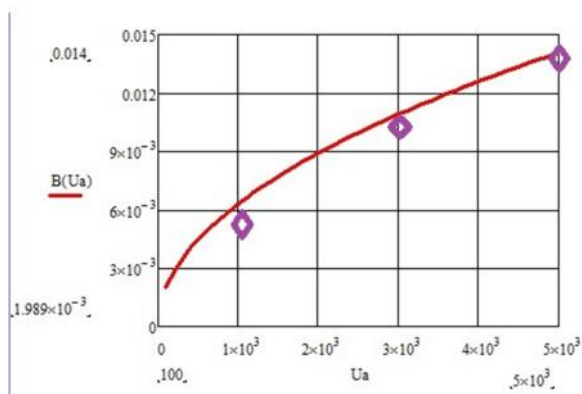


Рис. 7. Графік залежності критичного магнітного поля у поверхні катоду від напруги на аноді за виразом (7) та результати чисельного розрахунку

Залежність мінімального струму в індукторі, магнітне поле якого перешкоджає потраплянню електронів на анод від напруги на аноді приведено в таблиці нижче.

Анодна напруга, кВ	1	3	5
Струм індуктора, А	1,28	3,06	6,4

Висновки

Побудована фізико-топологічна модель дозволила провести розрахунки структури електричного та магнітного поля, траєкторії електронів та критичні параметри індукційного вимикача струму. Дослідження проведено з урахуванням впливу крайових ефектів на роботу.

Література

1. Лебедев И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т.2. Электроракуумные приборы СВЧ. - М.: Высшая школа, 1972.;
2. Бекк А. Электронные лампы. Теория и конструирование. - М.: Сов. радио, 1958.
3. Шимони К. Физическая электроника. - М.: Энергия. 1977.