

## НЕСТАБІЛЬНОСТІ ЗАМКНУТОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ В СТАТИЧНОМУ РЕЖИМІ ПРИБАДІВ М-ТИПУ

Гришков С.В., Грицунов О.В.

e-mail: [sviatoslav.hryshkov@nure.ua](mailto:sviatoslav.hryshkov@nure.ua)

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПП  
м. Харків, Україна

Despite numerous attempts to explain the causes of increased noise level in crossed-field devices (CFD), there is no clear understanding of the physical phenomena generating additional noise in crossed fields. Here, an attempt is made to numerically simulate and describe some parasitic oscillatory processes in the re-entrant electron flow in non-generating (static) state of CFDs. The results were obtained using the TULIPgm code, designed for full-format transient and spectral particle-in-cell CFD modeling. Spatio-temporal interpolation of the fields was performed using the new PWS method.

Незважаючи на численні спроби пояснити причини підвищеного рівня шуму вихідного сигналу в приладах зі схрещеними полями (магнетронах, амплітронах) [1], досі немає чіткого розуміння фізичних явищ, які створюють додаткову зашумленість коливань електронного потоку в цих приладах. У доповіді моделюються деякі позарежимні коливальні процеси в замкнутих потоках електронів поблизу катоду з розподіленою термоелектронною та вторинно-електронною емісією в негенеруючому (статичному) стані вказаних приладів. Крім погіршення якості сигналу, ці коливання також часто обмежують діапазон потужностей, що можуть бути досягнуті. Результати отримано за допомогою програми TULIPgm [2], призначеної для повноформатного нестационарного і спектрального моделювання НВЧ приладів методом часток (Particle in Cell, PIC) [3]. Просторово-часова інтерполяція полів проводилася за допомогою методу Polynomials with Smoothing (PWS) [4].

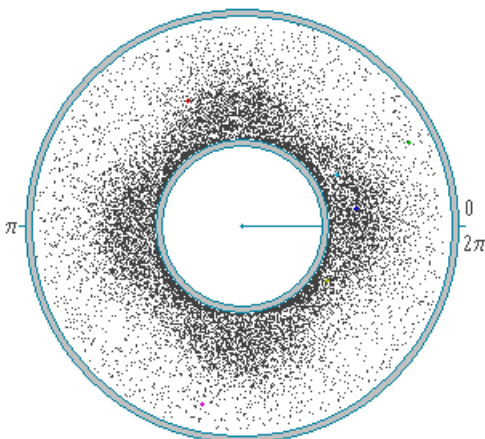


Рис. 1

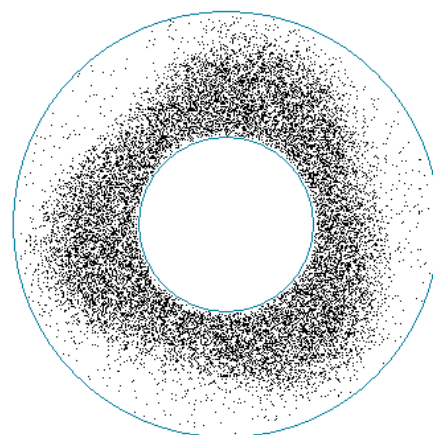


Рис. 2

Власні тангенціальні коливання електронної хмари в схрещених полях (рис. 1, 2) були відомі задовго до комп'ютерного моделювання. Однак у обчислювальних експериментах їх важко виявити через їхню нестабільність. Ці коливання можна спостерігати, лише якщо вторинна емісія з катода незначна. Період їх утворення занадто довгий (десятки або сотні циклотронних періодів) і згодом вони можуть бути замінені іншими видами (як правило, солітонами). Спектр наведеного струму під час тангенціальних коливань складається з однієї домінуючої гармоніки та кількох незначних суміжних компонент.

На відміну від власних коливань електронної хмари, вторинно-емісійні згустки в схрещених полях (рис. 3, 4) були виявлені під час моделювання з першими «повноформатними» кодами. Спочатку їх помилково визнали солітонами [5]. Пізніше, після спостережень справжніх солітонів, було встановлено різницю між обома механізмами групування.

У сучасній концепції, вторинно-емісійні пучки мають причиною нерівномірне вторинно-емісійне живлення неоднорідного в азимутальному напрямку потоку електронів. Прискорені кулонівським відштовхуванням електрони на передній межі згустку після їх закручування магнітним полем бомбардують поверхню катода. Емітовані тут вторинні електрони живлять згусток і викликають його обертання. На відміну від власних коливань, ці хмари дуже «агресивні». Вони виникають надто швидко (протягом кількох циклотронних періодів) і з'являються кожного разу, коли присутня вторинна емісія з катода. Обертання електронного потоку на всіх рисунках – за годинниковою стрілкою.

Істинна солітонна нестабільність електронної хмари (рис. 5, 6) є більш стійким видом, ніж власне коливання. Солітони у втулці можуть виникати самостійно або внаслідок переродження тангенціальних коливань або вторинно-емісійних згустків (як на рис. 4). Зазвичай спостерігається один або декілька солітонів, рівномірно розподілених по периметру втулки. Живлення піднятого над втулкою солітону здійснюється, як правило, через

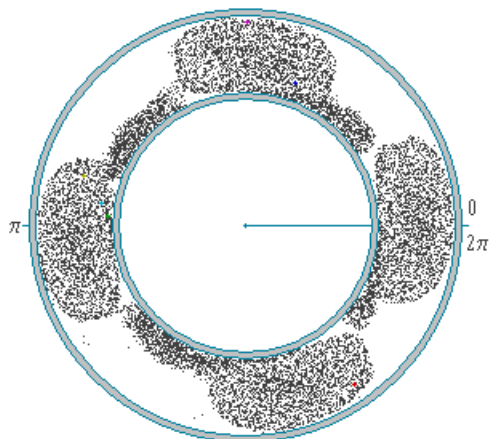


Рис. 3

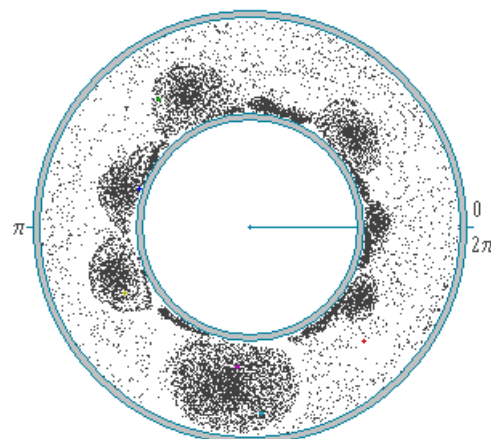


Рис. 4

вузьку «пуповину», яка його обвиває (рис. 5). У спектрі наведеного струму при солітонній нестабільності присутні декілька гармонік найнижчої частоти (тобто частоти обертання втулки) з відносно порівнянними амплітудами. Подібність такого спектру до експериментально виміряних спектрів шумових коливань у магнетронних діодах [1] може означати часте виникнення саме солітонних нестабільностей у схрещених полях. Інколи також може спостерігатися комбінація різних мод (наприклад, тангенціального коливання з солітоном, рис. 6).

Розглянуті види нестійкостей електронної хмари в схрещених полях визначають напрямки подальших досліджень, як в статичному, так і в динамічному (генеруючому) режимах приладів з замкнутим електронним потоком (магнетронів і амплітронів). Вони мають значення, зокрема, для створення потужних генераторних приладів сучасних систем радіоелектронної боротьби.

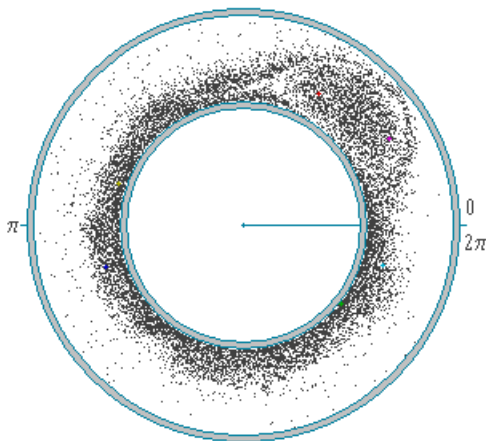


Рис. 5

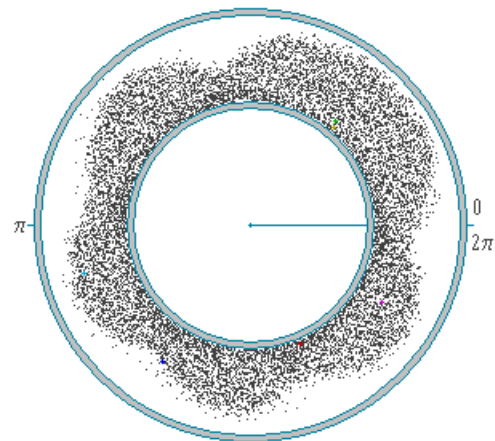


Рис. 6

#### Список використаних джерел:

1. Okress E., Ed. Crossed-field microwave devices. Vol. 1. Principal elements of crossed-field devices. NY: Academic Press, 1961. 648 p.
2. Грицунов О., Доля А. Архітектура програмної системи для проектування виробів електронної техніки // Матеріали 12-ї Міжнар. науково-техн. конф. «Інформаційні системи та технології» (ICT-2023). Харків, 2023. С. 1–4.
3. Hockney R. W., Eastwood J. W. Computer simulation using particles. NY: McGraw-Hill, 1981. 540 p.
4. Gritsunov A. About simulation of fields in large particles model // Proc. 1997 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conf., Vol. 2, Natal (Brazil), 1997. P. 517–519.
5. Agafonov A., Fedorov V., Tarakanov V. Self-sustaining secondary emission in magnetron guns, beam modulation and feedbacks // Proc. 1999 Particle Accelerator Conf., NY, 1999. P. 1734–1736.