

**НЕСТАБІЛЬНОСТІ ЗАМКНУТОГО ЕЛЕКТРОННОГО
ПОТОКУ В ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ ПРИЛАДІВ М-ТИПУ**

Гришков С.В., Грицунов О.В.

e-mail: sviatoslav.hryshkov@nure.ua

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

In dynamic (generating) state of crossed-field devices (CFD), some parasitic oscillations taking a place in non-generating CFDs (e.g., the natural oscillations of electron cloud) are suppressed by a mechanism of spoke's formation. Instead, other probable sources of noise and instabilities might appear. Revolving convective clouds of a space charge periodically breaking away from the hub and moving to the anode, as well as stable clouds at tops of the spokes, are among the most notable. Their shapes and dynamic internal structures are very similar to the true solitons in a magnetron diode. The physical origins of both items seem as identical.

Всупереч давнім спробам пояснення причин підвищеного рівня шуму в приладах М-типу [1], досі немає чіткого розуміння фізичних явищ, які створюють додаткову зашумленість електронного потоку. У першій частині нашої роботи [2] розглядалися механізми небажаних коливань електронної хмари в негенеруючому (статичному) режимі приладів М-типу з катодом у просторі взаємодії й замкнутим електронним потоком. У генеруючих приладах деякі паразитні коливання, що виникають у негенеруючих пристроях (наприклад, власні коливання електронної втулки), пригнічуються механізмом формування спиць. Натомість, одним із ймовірних джерел шуму тут можуть бути обертові конвективні хмари просторового заряду. Їхні форми та динамічні структури схожі на конфігурації солітонів у магнетронному діоді [2]. Фізична природа обох явищ, вочевидь, ідентична.

В чисельному експерименті спостерігаються два типи конвективних хмар: такі, що періодично відриваються від втулки та рухаються до анода, та стабільні хмари на вершинах електронних спиць. Перші спостерігалися ще в [3]. Другі, схоже, досі не були детально описані.

Стохастичний відрив конвективних хмар від втулки (рис. 1) відбувається, як правило, поблизу низьковольтної межі вольтамперної характеристики. Це призводить до квазірегулярної або стохастичної модуляції збуджуючого струму i , як наслідок, до збільшення рівня шуму вихідного сигналу та появи бічних смуг у вихідному спектрі (рис. 2, частота приладу 2,8 ГГц). При великих струмах періодичне порушення форми спиць замінюється їх стабільним формуванням, і спектр сигналу звужується (рис. 3). Піки PSD при 3,74 ГГц на рис. 2 та 3 відповідають слабо збудженій нормальній моді $N/2-1$ сповільнюючої системи.

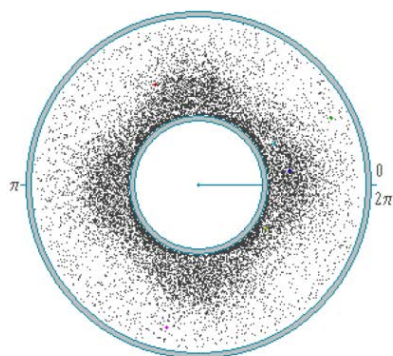


Рис. 1

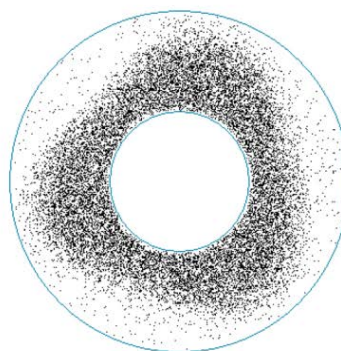


Рис. 2

Стабільні конвективні хмари на вершинах спиць з великим анодним струмом (рис. 4) спостерігаються не у всіх приладах М-типу. Можливим поясненням є те, що напруженість радіочастотного електричного поля в магнетроні, як правило, більша, ніж в амплітроні при порівнянних рівнях вихідної потужності. Це призводить до утворення вузьких вершин спиць у магнетронах та пригнічення генерації хмар. Рис. 1-4 отримані для магнетрона 4J33, як для пристрою, де конвективні явища виражені доволі сильно. В амплітронах, навпаки, стабільні конвективні хмари в спицях виникають для більшості приладів у широких діапазонах вихідних потужностей та анодних напруг (див., наприклад, рис. 5 роботи [4]). При великих струмах хмари в амплітроні розширюються та частково руйнуються, але не зникають повністю. Коливання розмірів та форм обертових хмар збільшують зашумленість. Підвищене бомбардування анода зовнішніми межами хмар також може знизити ККД приладу.

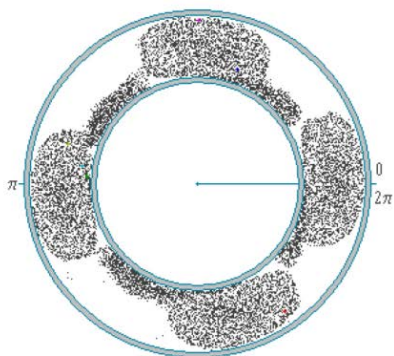


Рис. 3

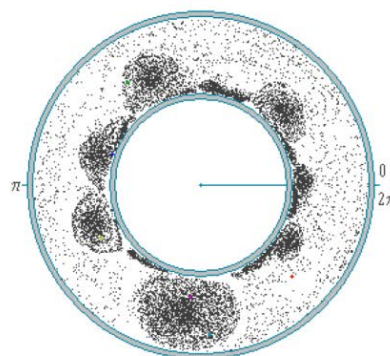


Рис. 4

В амплітронах з холодними вторинно-емісійними катодами генерація солітоноподібних хмар на верхівках спиць може поєднуватися зі вторинно-емісійним групуванням втулки, що описане в [2]. Це ускладнює структуру електронного потоку і призводить, як правило, до збільшення побічних коливань конвекційного струму та, відповідно, рівня шуму вихідного сигналу. Більше того: в деяких випадках вторинно-емісійні угруповання можуть періодично порушувати процес формування електронних спиць навіть в

потужних амплітронах з холодним катодом (рис. 5). Це проявляється як хаотичне тимчасове зменшення амплітуди вихідного сигналу (рис. 6) та призводить до зростання шумового фону навколо піку основного сигналу у вихідному спектрі приладу. Рис. 5 і 6 отримані для імпульсного амплітрона S-діапазону потужністю 1 МВт з холодним платино-барієвим катодом.

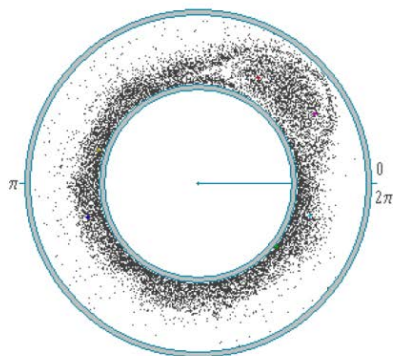


Рис. 5

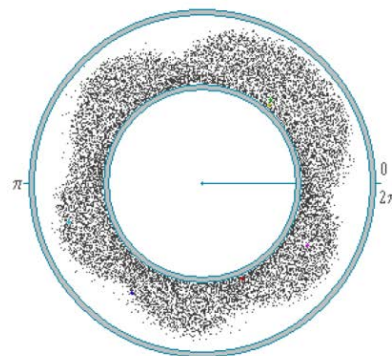


Рис. 6

Розглянуті види нестійкостей електронного потоку в генеруючих приладах М-типу визначають головні напрямки подальших досліджень, як в статичному, так і в динамічному режимах приладів з замкнутим електронним потоком (магнетронів і амплітронів). Окрім покращення якості систем зв'язку й радіолокації, вони необхідні, у тому числі, для розробки перспективних потужних широкосмугових генераторів сучасних систем радіоелектронної боротьби з БПЛА [5].

Список використаних джерел:

1. Okress E., Ed. Crossed-field microwave devices. Vol. 1. Principal elements of crossed-field devices. NY: Academic Press, 648 p. (1961).
2. Гришков С.В., Грицунов О.В. Нестабільності замкнутого електронного потоку в статичному режимі приладів М-типу // Матеріали 29-го Міжнар. молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті», т. 1. Харків: ХНУРЕ, с. 11–13 (2025).
3. Thomas G. E., Bollen W. M., Kaup D. J. *et al.* A new interpretation of the time evolution of the RF electric field in a crossed-field device // In: IEDM Technical Digest, pp. 180–183 (1985).
4. Бондаренко І.М., Гнатенко О.С., Грицунов О.В. та ін. Архітектура програмної системи TULIPgm для проєктування вакуумних підсилювачів і генераторів НВЧ-діапазону // Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. Вип. 221, с. 113–126 (2025).
5. Бондаренко І.М., Стрілкова Т.О., Грицунов О.В. та ін. Систематизація програмних модулів пакета TULIPgm для проєктування мікро- та наноелектронних систем // Матеріали Міжнар. конф. «Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека» (ІКТК-2025). Харків: ХНУРЕ, с. 178–181 (2025).