

І.М. БОНДАРЕНКО д-р фіз.-мат. наук, *О.С. ГНАТЕНКО*, канд. фіз.-мат. наук,
О.В. ГРИЦУНОВ, д-р фіз.-мат. наук, *О.Г. ПАЩЕНКО*, канд. фіз.-мат. наук,
Г.М. БЕНДЕБЕРЯ, *М.А. КОПОТЬ*, *С.В. ГРИШКОВ*

СПЕКТРАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНКУРЕНЦІЇ ВИДІВ КОЛИВАНЬ В МАГНЕТРОНІ З СУТТЄВИМ ВПЛИВОМ ПРОСТОРОВОГО ЗАРЯДУ

Вступ

Проблема придушення та знищення малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах їх масового застосування здобула чималу актуальність під час російсько-української війни. Серед радіотехнічних та електронних методів її вирішення виділяють основні:

- перевантаження нелінійних електронних схем постійним мікрохвильовим випромінюванням достатньої потужності;
- незворотне пошкодження електроніки БПЛА короткими електромагнітними імпульсами потужного генератора мікрохвиль [1, 2].

У попередній роботі [3] розглянуто загальні питання комп'ютерного моделювання та оптимізації параметрів і характеристик вакуумних НВЧ приладів, що можуть бути використані в системах протидії малим та середнім БПЛА, а також в інших застосуваннях, де потрібна генерація електромагнітних НВЧ імпульсів великої інтенсивності. Програмний комплекс TULIPgm призначено для нестационарного та спектрального моделювання НВЧ приладів методом «частка в комірці» (PIC). Але окрім проєктно-конструкторського призначення, комплекс TULIPgm може бути використаний для дослідження фізичних процесів при взаємодії сповільнених електромагнітних хвиль з електронними потоками, як у схрещених полях, так і поздовжньої. Наприклад, однією з областей застосувань може бути аналіз процесів «перескоку» (зміни) видів коливань в приладах М-типу, що є одними з найбільш негативних явищ, які обмежують електронні параметри цих приладів та погіршують їх електромагнітну сумісність (ЕМС), особливо під час інтенсивного використання електромагнітного спектру НВЧ в умовах бойових дій.

Стационарна робота магнетронів, як і інших приладів М-типу з катодом у просторі взаємодії, на побічних модах достатньо досліджена, у тому числі шляхом чисельного моделювання (див., наприклад, [4 – 7]). Однак сам процес переходу з виду на вид вивчений неповністю, особливо це стосується еволюції спектрів збуджуючих струмів і вихідних сигналів в нестационарному режимі. Враховуючи практичну важливість цього питання з точки зору проблем ЕМС, наведемо результати чисельного аналізу зазначених явищ за допомогою спектральних моделей, що входять до складу пакету TULIPgm.

Метою статті є комп'ютерне моделювання перехідних процесів та спектрів сигналів при зміні робочого виду коливань для одного з типових різновидів приладів М-типу – магнетрона середньої потужності. Особливістю фізичних процесів взаємодії у таких генераторах є значний вплив полів просторового заряду електронної втулки та спиць (порівняно з магнетронами великої потужності) на механізм формування електронної конфігурації («хмари»), її форму та стабільність і, опосередковано, на вольтамперні характеристики (ВАХ) приладу.

Причини і види побічних коливань у магнетронах

Магнетрон є типовим представником класу НВЧ приладів М-типу з замкнутим (циліндричним) електронним потоком і катодом в просторі взаємодії. Така конструкція (замкнутий простір взаємодії) визначає не лише характер енергообміну електронного потоку з високочастотним полем на робочому виді коливань, а й специфічність побічних коливань. Основні джерела цих коливань у приладах з розподіленим катодом пов'язані з багатомодовістю періодичної (сповільнюючої) резонансної системи, властивостями електронного потоку та конструктивними особливостями простору взаємодії.

1. Електродинамічна система, яка використовується для уповільнення електромагнітної хвилі, як і будь-яка періодична система на НВЧ, є багатомодовою. У такій системі можуть збуджуватись різні види коливань (моди) як в основній, так і у вищих смугах пропускання. Ці види відрізняються один від одного власною частотою, структурою ВЧ поля у просторі взаємодії, а також напрямом поширення просторової гармоніки, з якою взаємодіє електронний потік. Зазвичай для взаємодії використовується той вид коливання, одна з просторових гармонік якого виявляється в синхронізмі з електронним потоком. Однак з різних причин у просторі взаємодії можуть збуджуватися й інші види коливань у резонансній структурі, причому частоти збудження можуть виявитися як у робочій смузі пропускання приладу, так і за її межами. Коливання на цих частотах вважаються побічними.

Побічні коливання можуть виникати також на просторових гармоніках у вищих смугах пропускання резонансної системи. Збудження просторових гармонік полегшується тим, що в приладах М-типу електронний потік є багатошвидкісним, і якась частина електронів потоку може виявитися в синхронізмі з неробочою просторовою гармонікою, причому взаємодія може здійснюватися як на прямих, так і на зворотних хвилях.

2. Іншим джерелом побічних коливань є безпосередньо електронний потік у просторі взаємодії. При взаємодії електронів із полем резонансної системи у схрещених полях форма електронного потоку суттєво інша, ніж у статичному режимі приладу. Виникає угруповання спиць: потік стає не лише багатошвидкісним з епітрохоїдальними траєкторіями електронів, що перетинаються, а різко змінюються й межі потоку. З'являються гармоніки конвекційного струму, спектр яких значною мірою визначаються формою електронних спиць. Істотними виявляються також коливання електронного потоку у напрямку осі приладу (вздовж силових ліній постійного магнітного поля). Епітрохоїдальний характер руху електронів є джерелом інтенсивних шумових коливань, властивих приладам М-типу з катодом у просторі взаємодії. І, нарешті, у замкнутому електронному потоці з'являється додаткова нестійкість, обумовлена механізмом позитивного зворотного зв'язку. Електронний потік набуває властивостей електронного багатомодового резонатора, в якому можуть збуджуватися власні коливання.

3. Збудження побічних коливань може бути внаслідок існування паразитних резонансних областей, пов'язаних з пристроями енергії, торцевими або бічними порожнинами, що примикають до робочого простору взаємодії, і залежать від особливостей конструктивного виконання приладу. Коливання можуть виникати і під дією інших факторів (форми живлячої електричної напруги, неоднорідності статичних електричного і магнітного полів тощо).

Внаслідок суттєвої нелінійності процесів у схрещених полях і відносно складних граничних умов, дослідження збудження побічних коливань у приладах М-типу з катодом у просторі взаємодії аналітичними методами принципово неможливо (навіть у стаціонарних режимах). Натомість, існуючі на сьогодні чисельні моделі РІС (обчислювальний експеримент) дозволяють відносно легко виконати такий аналіз, включаючи нестационарні режими приладів. Особливо широкі можливості щодо цього є у так званих спектральних моделей [8, 9], спеціально розроблених для вирішення подібних задач.

Далі на прикладі відносно розповсюдженого типу приладів зі схрещеними полями з катодом у просторі взаємодії – магнетрона для мікрохвильового нагріву – буде проаналізовано процеси збудження та руйнування побічних коливань і відповідні спектри вихідного сигналу, типові для більшості приладів М-типу.

Загальний опис перехідних процесів при конкуренції видів коливань

Дослідження конкуренції видів коливань в схрещених полях проводиться на чисельній моделі реального магнетронного приладу: 0,7-кіловатного магнетрона для побутових мікрохвильових печей М-136, конструктивні дані якого наведено в табл. 1. Використовується Задача Magnol (MAGNetron Oscillator) для двовимірного моделювання звичайних та інвертованих магнетронів зі складу пакета програм TULIPgm, детально описаного в публікації [3]. Алгоритми Задачі аналогічні розглянутим в роботах [10 – 14].

Таблиця 1

Параметр	Позначення	Значення
Радіус катоду, мм	R_c	2,3
Радіус анода, мм	R_a	4,45
Висота анодного блока, мм	H_a	10,0
Кількість резонаторів	N	10
Товщина ламелей, град	θ	20,6
Матеріал катоду	—	Оксид
Власна частота нормального виду $N/2$, ГГц	$f_{N/2}$	2,45
Власна частота нормального виду $N/2-1$, ГГц	$f_{N/2-1}$	4,4
Власна частота нормального виду $N/2-2$, ГГц	$f_{N/2-2}$	5,3
Власна добротність нормального виду $N/2$	$Q_{intN/2}$	1400,0
Власна добротність нормального виду $N/2-1$	$Q_{intN/2-1}$	1000,0
Власна добротність нормального виду $N/2-2$	$Q_{intN/2-2}$	750,0
Внесена добротність нормального виду $N/2$	$Q_{extN/2}$	140,0
Внесена добротність нормального виду $N/2-1$	$Q_{extN/2-1}$	400,0
Внесена добротність нормального виду $N/2-2$	$Q_{extN/2-2}$	600,0
Ємність нормального виду $N/2$, пФ	$C_{N/2}$	6,84
Ємність нормального виду $N/2-1$, пФ	$C_{N/2-1}$	12,1
Ємність нормального виду $N/2-2$, пФ	$C_{N/2-2}$	15,0
Індукція постійного магнітного поля, Тл	B_0	0,157

Початкова робоча напруга магнетрона М-136 (напруга Хартрі [15, 16]) становить 2,97 кВ; максимальна робоча напруга (згідно з технічною документацією) – близько 3,9 кВ. При анодній напрузі приблизно 4,2 кВ відбувається перехід приладу з $N/2$ (основного, π) нормального виду резонансної системи (рис. 1) на сусідній ($N/2-1$) нормальний вид (рис. 2), напруга Хартрі якого становить 4,05 кВ. Перехідний процес при цьому триває приблизно 80 ... 120 нс (200 ... 300 періодів робочого виду, рис. 3). Видно, що протягом цього часу амплітуда коливання основного виду згасає приблизно за експоненціальним законом, а амплітуда коливання виду $N/2-1$ збільшується, досягаючи насичення (A/A_{max} – нормовані на стаціонарні значення амплітуди $N/2$ та $N/2-1$ видів).

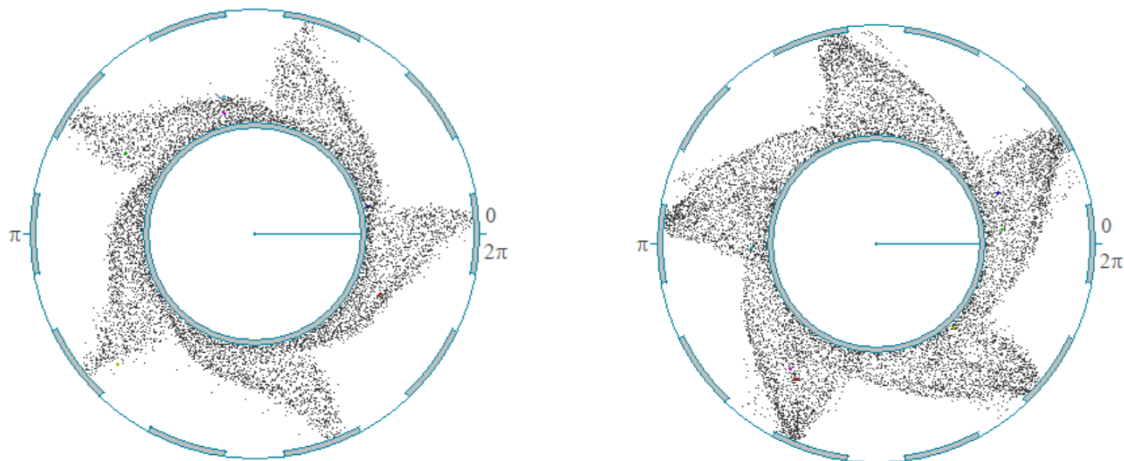


Рис. 1. Розподіли просторового заряду поблизу низьковольтної межі основного ($N/2$) виду коливань ($U_a = 3,05$ кВ, зліва) та на високовольтній межі основного виду коливань ($U_a = 4,0$ кВ, справа)

Протягом перехідного процесу конфігурація електронної хмари формується обома видами коливань з порівнянними амплітудами і є досить складною (рис. 4). Загальна тривалість транзитного періоду при зміні видів коливань визначається не інерційністю електронної хмари (з цього погляду її можна вважати практично безінерційною), а енергією, накопиченою в попередній моді коливальної системи, і енергією кінцевої моди, тобто, навантаженими добротностями обох мод. Для параметрів електродинамічної системи, наведених в

табл. 1, практичне закінчення перехідного процесу відбувається приблизно через 250 періодів основного виду коливання з моменту стрибкоподібної зміни анодної напруги з 4,1 до 4,2 кВ. До цього моменту формується стійка конфігурація електронної хмари з шістьма спицями (мінус перша просторова гармоніка нормальної моди $N/2-1$, рис. 2).

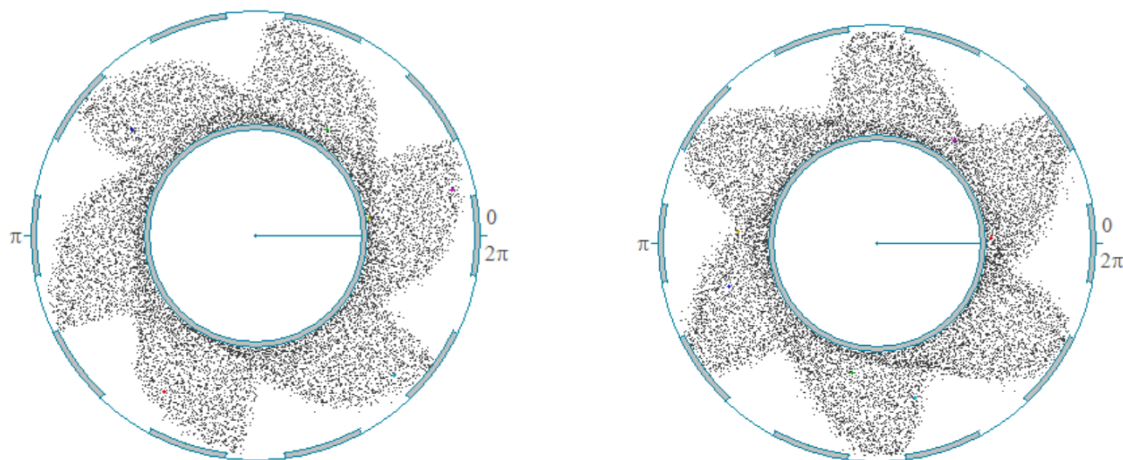


Рис. 2. Розподіли просторового заряду поблизу низьковольтної межі побічного ($N/2-1$) виду коливань ($U_a = 4,1$ кВ, зліва) та на високовольтній межі побічного виду коливань ($U_a = 4,4$ кВ, справа)

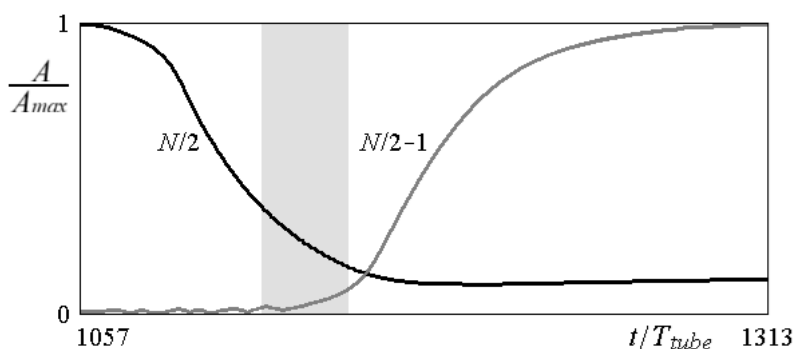


Рис. 3. Процес переходу від основного ($N/2$) виду коливань до сусіднього ($N/2-1$) виду ($U_a = 4,2$ кВ).
 A/A_{max} – нормовані амплітуди $N/2$ та $N/2-1$ видів

Специфікою приладів М-типу зі суттєвим впливом просторового заряду на процес взаємодії (як, наприклад, в магнетронах малої та середньої потужності) є гістерезисний характер ВАХ окремих видів коливань (рис. 5), що свідчить про підвищену нелінійність процесу взаємодії між електромагнітною хвилею та електронною хмарою. Гістерезис виявляється у відмінності анодних напруг, при яких має місце перехід приладу від певного типу коливань до сусіднього і навпаки. Наприклад, у дослідженому випадку при поступовому підвищенні анодної напруги при роботі на основному виді цей вид зберігається аж до напруг, близьких до $U_{12} \approx 4,2$ кВ. Лише при вказаному значенні запускається процес руйнування конфігурації електронної хмари з п'ятьма спицями. Навпаки, при зниженні анодної напруги під час роботи на ($N/2-1$) виді конфігурація з шістьма спицями продовжує існувати до аж напруг, близьких до $U_{21} \approx 4,0$ кВ, тобто руйнування її починається лише при вказаному значенні. Вочевидь, ступінь «затягування» моди визначається відносною різницею напруг перескоку $\delta U = 2|U_{21} - U_{12}| / (U_{12} + U_{21}) \approx 5\%$ для приладу, що моделюється.

З фізичного погляду описане явище гістерезису можна пояснити тим, що в суттєво нелінійних електронно-хвильових системах при наявності двох чи більше видів коливань переважачий вплив на електронну хмару виявляє електромагнітне поле з найбільшою амплітудою. Воно «підтягує» конфігурацію угруповання спиць під вид коливання резонансної

системи, який збуджено в поточний момент, тим самим необмежено подовжуючи час його існування в області ВАХ, яка «належить» вже іншому виду.

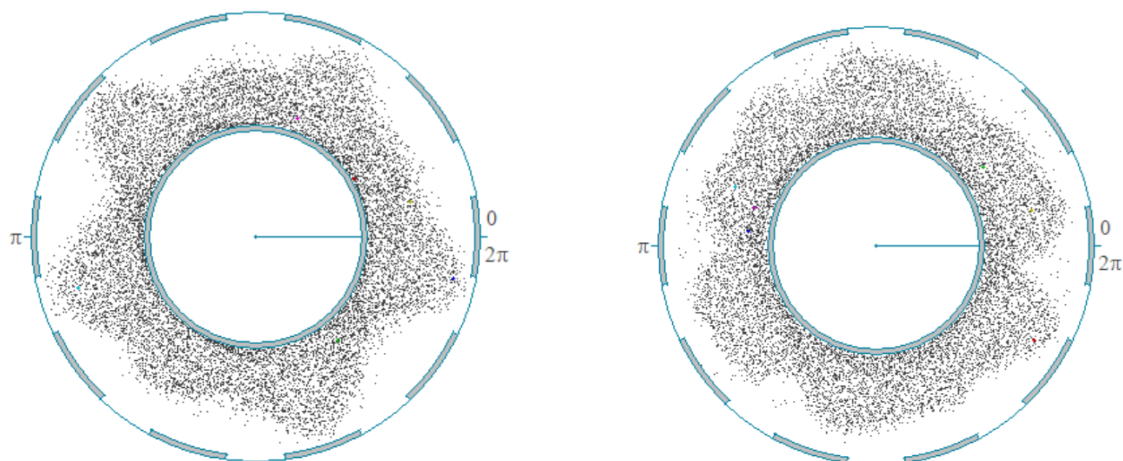


Рис. 4. Розподіли просторового заряду протягом переходу від основного ($N/2$) виду коливань до сусіднього ($N/2-1$) виду ($U_a = 4,2$ кВ, зліва) та зворотного переходу ($U_a = 4,0$ кВ, справа)

Є припущення, що δU має зменшуватися з підвищенням потужності приладу, оскільки у високоенергетичних магнетронів відносний вплив просторового заряду і, відповідно, нелінійність електронно-хвильового угруповання, зазвичай менші. Щоб це підтвердити чи спростувати, необхідні додаткові дослідження.

Поряд з дослідженням переходу між видами $N/2$ та $N/2-1$ було проведено спробу моделювання транзиту режиму роботи приладу М-136 від $N/2-1$ до $N/2-2$ виду. Напруга Хартрі виду $N/2-2$ становить 4,14 кВ, тобто лише незначно перевищує відповідну напругу моди $N/2-1$. Можливо, це є причиною того, що збудження виду $N/2-2$ не вдається спостерігати. При збільшенні анодної напруги до значень понад 4,4 кВ відбувається необоротне руйнування спицевого угруповання $N/2-1$ з відповідним поступовим зникненням анодного струму (рис. 5). Спроби досягти «штучної» переваги моди $N/2-2$ над модою $N/2-1$ (наприклад, шляхом зменшення навантаженої добротності другої) також не призводять до очікуваного результату.

Спектральні характеристики високочастотних полів та струмів

Дослідження частотних характеристик НВЧ приладів у спектральних моделях пакета TULIPgm ґрунтується на понятті так званої базової частоти приладу f_{tube} . Це не обов'язково власна частота якогось із видів коливань резонансної системи, а умовна частота, яка визначає часовий масштаб еволюції приладу, що моделюється, а також вихідні дані алгоритмів спектрального та гармонічного аналізу. Базова частота – особливість спектральних моделей [8, 9], які не «прив'язуються» до апіорі заданих частот вхідних сигналів чи очікуваних коливань потоку, як їх попередні одно- та багаточастотні аналоги. Тут використовується значення $f_{tube} = 2,3$ ГГц (нагадаємо, що

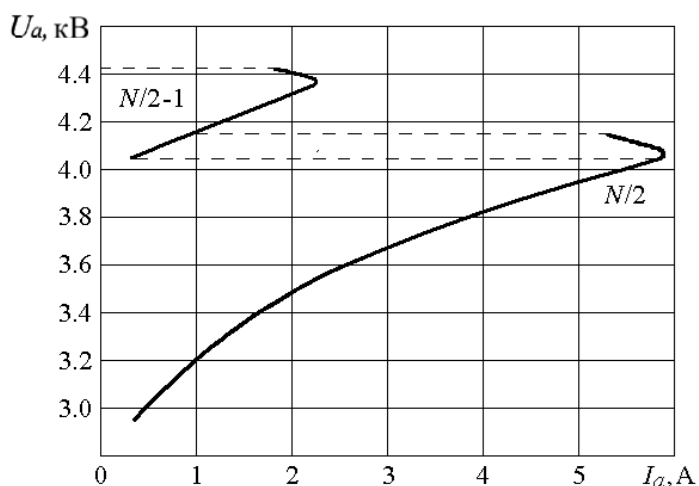


Рис. 5. ВАХ основного ($N/2$) і сусіднього ($N/2-1$) видів коливань та явище їх гістерезису

власна частота π -виду резонансної системи дорівнює 2,45 ГГц). Базову частоту завжди рекомендується вибирати дещо відмінною від частот усіх можливих видів коливань приладу, оскільки в іншому випадку деякі важливі для дослідження спектральні компоненти можуть потрапити на межу між частотними вікнами. Інколи використовується також термін «період приладу» $T_{tube} = 1 / f_{tube}$.

Гармонічний і спектральний аналіз полів і струмів НВЧ приладів у пакеті TULIPgm здійснюється за допомогою сучасних параметричних алгоритмів спектрального моделювання. Використовуються процедури спектрального аналізу дійсних і комплексних часових рядів за допомогою модифікованого коваріаційного методу [17], а також гармонічного розкладання в ряди Фур'є за допомогою первинних методів Проні і методів найменших квадратів Проні (включаючи змішаний підхід [18]) та всіх подальших їх удосконалень.

Апріорі очевидно, що при зміні виду коливання магнетрона спектр збуджуючого струму (спицевого угруповання) та, відповідно, наведеного ним в резонансній системі електромагнітного поля еволюціонує від відповідного стаціонарного режиму приладу на виді $N/2$ до стаціонарного спектру цього ж приладу на виді $N/2-1$, проходячи через змішаний перехідний стан з великою кількістю комбінаційних складових. Саме в цей період виникає найбільша небезпека «засмічення» електромагнітного спектру навколишнього середовища неприпустимими для сусідніх радіотехнічних та електронних систем випромінюваннями, особливо якщо «перескоки» виду коливань відбуваються систематично (так зване «дрижання імпульсу»). Нагадаємо, що навіть у мікрохвильовій печі магнетрон, як правило, працює в імпульсному режимі [19].

Як вихідний, виберемо стаціонарний режим роботи магнетрона М-136 на виді $N/2$. Анодна напруга дорівнює 3,05 кВ (поблизу низьковольтної межі основного виду коливань). Розподіл об'ємного заряду в приладі для цього режиму показано на рис. 1, зліва. Спектр гармонік вихідного сигналу, отриманий методом найменших квадратів Проні, зображено на рис. 6. Довжина вибірки становить 256 періодів приладу. Добре просліджується домінуюча компонента основного сигналу з частотою виду $N/2$ ($1,065f_{tube}$ або 2,45 ГГц) та її друга гармоніка ($2,13f_{tube}$ або 4,9 ГГц, не показана). Також простежується частота виду $N/2-1$ ($1,91f_{tube}$ або 4,4 ГГц). Спектри вихідних сигналів при роботі магнетрона з більшими анодними напругами принципово не відрізняються від описаного, доки має місце стабільна генерація на моді $N/2$. Зокрема, відносні амплітуди бічних складових (по відношенню до основного сигналу) практично не змінюються.

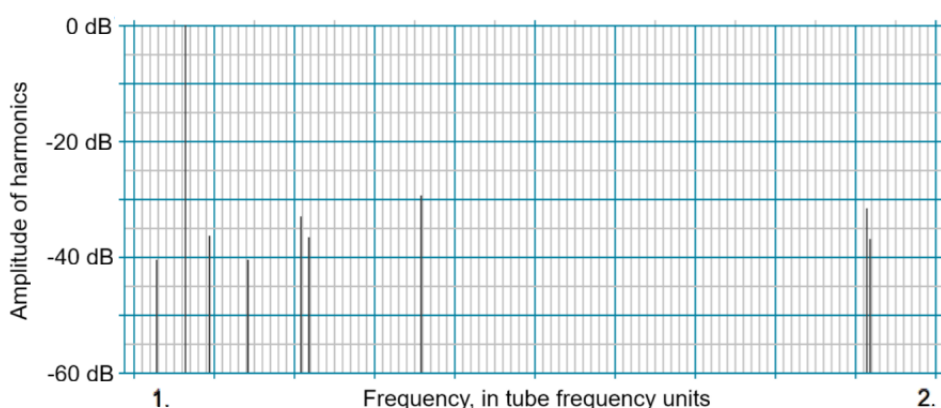


Рис. 6. Спектр вихідного сигналу поблизу низьковольтної межі основного ($N/2$) виду коливань ($U_a = 3,05$ кВ)

При збільшенні анодної напруги до 4,2 кВ починається поступове руйнування спицевого угруповання виду $N/2$ і зменшення амплітуди відповідної моди резонансної системи. Одночасно зростає амплітуда $N/2-1$ виду, злегка збудженого і раніше (при роботі приладу на π -виді). Часова залежність цієї амплітуди в загальних рисах аналогічна до наростання амплітуди робочого виду при включенні магнетрону [20] (рис. 3). Однак є суттєві відмінності у

конфігурації електронного потоку, обумовлені одночасним існуванням протягом тривалого часу обох видів коливань сумісної амплітуди. Протягом цього періоду електронна втулка піддається впливу електромагнітних полів двох нормальних мод резонансної системи з різними частотами і хвильовими числами. Як наслідок нелінійності електронного потоку в схрещених полях, структура електронної хмари стає цілком нерегулярною (рис. 4). Звідси впливає ймовірність наявності у спектрі вихідного сигналу великої кількості комбінаційних складових частот обох нормальних мод та їх гармонік, а також компонент, пов'язаних із власними коливаннями електронної хмари. На рис. 7 наведено спектр вихідного сигналу у перехідному режимі системи, отриманий в межах затемненого часового інтервалу на рис. 3. Помітно розширення смуги складових обох нормальних мод (з частотами $1,065f_{tube}$ і $1,913f_{tube}$). Крім того, спостерігається велика група спектральних компонент в околиці частоти $1,5f_{tube} = 3,45$ ГГц. На рис. 4 неможливо зіставити цим компонентам певне угруповання електронного потоку, проте складова з такою частотою чітко простежується і в спектрі наведеного струму зонда. За межами зображеного на рис. 7 діапазону з'являються також інші компоненти.

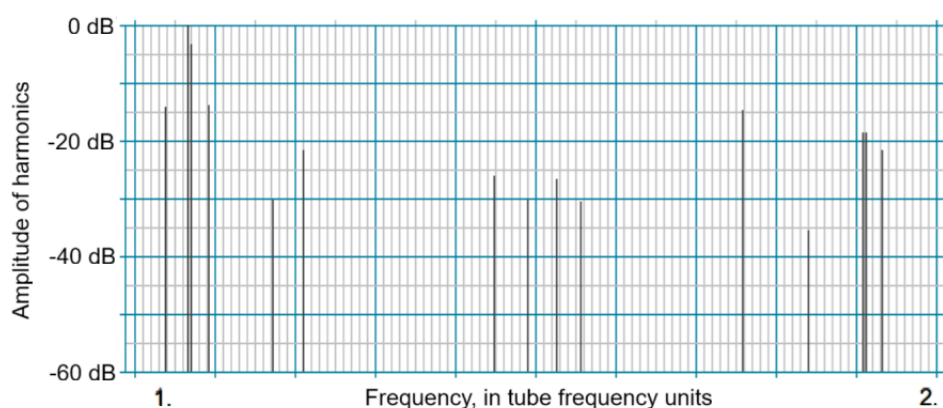


Рис. 7. Спектр вихідного сигналу у перехідному режимі системи ($U_a = 4,2$ кВ)

На момент закінчення перехідного процесу формується стійка конфігурація електронної хмари з шістьма спицями (рис. 2). Спектр вихідного сигналу «очищується» (рис. 8). Крім домінуючої складової з частотою $N/2-1$ моди ($1,91f_{tube}$ або 4,4 ГГц), в ньому присутня несподівано велика гармоніка π -виду з амплітудою близько $-(5 \dots 7)$ дБ від амплітуди високовольтної моди. Причина сильного збудження виду $N/2$ електронним потоком, конфігурація якого на перший погляд ортогональна просторовій структурі цього виду, залишається поки що нез'ясованою. Спостерігаються стабільна гармонійна компонента з частотою близько $0,85f_{tube}$ або 1,95 ГГц, що є, очевидно, різницевою частотою між видами $N/2$ та $N/2-1$, а також складова з частотою приблизно $2,74f_{tube}$ або 6,3 ГГц (обидві не показані), яка утворюється, імовірно, в результаті нелінійної взаємодії другої гармоніки виду $N/2-1$ з π -видом. Походження ще однієї порівняно стійкої гармоніки на частоті приблизно $1,74f_{tube}$ або 4,0 ГГц (також не показана) не встановлено. Можливо, вона є інтермодуляційним компонентом між іншими гармоніками зазначених видів коливань.

Для порівняння можливих спектральних оцінок, на рис. 9 показано спектр збуджуючого струму у приладі, що працює на стаціонарному $N/2$ виді (анодна напруга також дорівнює 3,05 кВ). Спектр отримано за допомогою «прозорого» зонда малого розміру, розміщеного посередині між катодом і анодом. «Прозорий» зонд генерує наведений струм, на зразок реального металевого електрода, розташованого в тому ж місці, проте, на відміну від нього, не впливає на рух електронів. Гармонічний аналіз наведеного на зонд струму здійснюється модифікованим коваріаційним методом. Довжина вибірки дорівнює $256T_{tube}$. Порівняно з рис. 6, спектр на рис. 9 містить більше гармонічних компонент, але значна частина їх – малоінформативні шуми моделі. Тому завжди бажано використання різних методів оцінки спектрів.

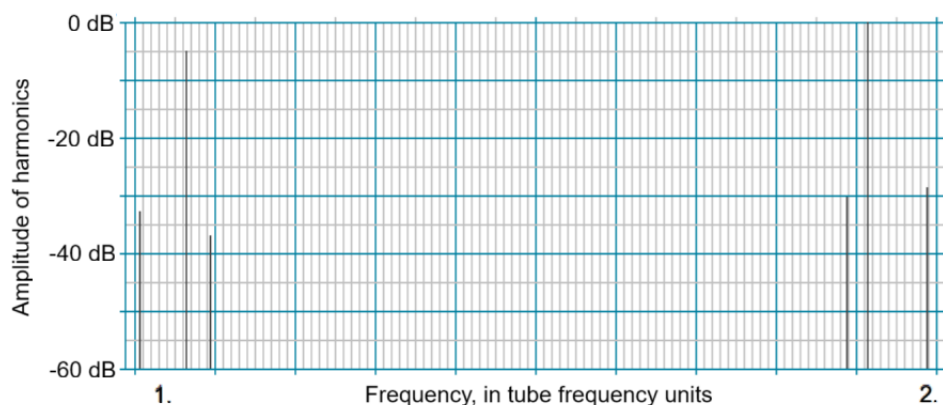


Рис. 8. Спектр вихідного сигналу на високовольтній межі побічного ($N/2-1$) виду коливань ($U_a = 4,4$ кВ)

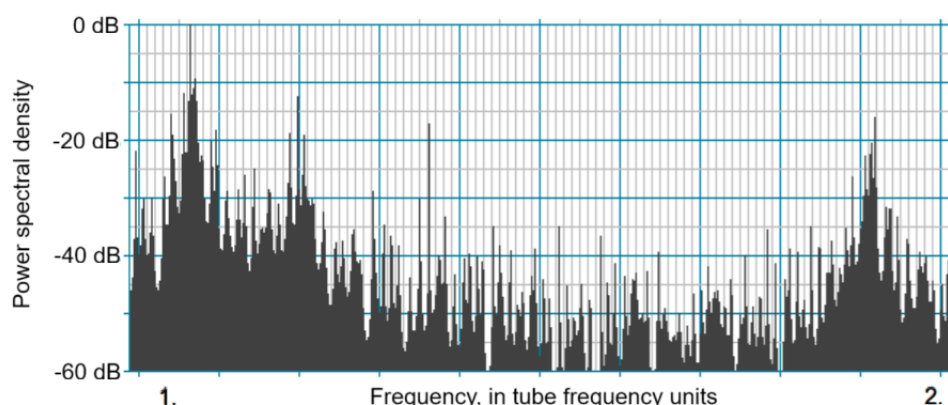


Рис. 9. Спектр збуджуючого струму поблизу низьковольтної межі основного ($N/2$) виду коливань ($U_a = 3,05$ кВ)

Висновки

1. Спонтанна (незапланована) зміна видів коливань є одним з найбільш неприємних явищ, які обмежують електронні параметри приладів М-типу як малої, так і великої потужності, негативно впливають на якість сигналу та погіршують електромагнітну сумісність з іншими радіоелектронними системами, особливо під час інтенсивного використання електромагнітного спектру НВЧ в умовах бойових дій.

2. Повноцінне комп'ютерне моделювання процесів конкуренції видів коливань у принципово нелінійних приладах зі схрещеними полями стало можливим лише після появи спеціально розроблених для цієї мети алгоритмів, відомих під назвою «спектральні моделі».

3. Особливості зміни видів коливань у магнетронних приладах з розподіленим катодом визначаються, серед іншого, впливом об'ємного заряду електронного угруповання. При суттєвій (порівняно з соленоїдними полями електродинамічної системи) ролі кулонівської взаємодії в електронному потоці ВАХ конкуруючих видів набувають гістерезисного характеру.

Список літератури:

1. Atherton K.D. (2023) The Air Force Used Microwave Energy to Take Down a Drone Swarm. Available at: <https://www.popsci.com/technology/thor-weapon-drone-swarm-test/>
2. Nikolov B. (2025) UK's new microwave weapon neutralizes drone swarms for pennies, Bulgarian Military Industry Review. Available at: <https://bulgarianmilitary.com/2025/04/17/uks-new-microwave-weapon-neutralizes-drone-swarms-for-pennies/>
3. Бондаренко І.М., Гнатенко О.С., Грицунов О.В., Пашенко О.Г., Карнаушенко В.П., Копоть М.А. Архітектура програмної системи TULIPgm для проєктування вакуумних підсилювачів і генераторів НВЧ-діапазону // Радіотехніка. 2025. Вип. 221. С. 113–126.
4. Churyumov G.I., Frolova T.I., Gritsunov A.V., Nikitenko O.M., Prokopchik V.A. Analysis of mode competition in magnetrons // Proc. Fifth IEEE Int. Vacuum Electronics Conf. (IVEC 2004), Monterey, California (USA). P. 232–233.

5. Baiburin V.B., Eremin V.P., Sysuev A.V. et al. Numerical modeling of magnetron generators with allowance for the mode competition // *Tech. Phys. Lett.* 2000. Vol. 26. P. 153–155.
6. Neculaes, V.B., Gilgenbach R.M., Lopez M. et al. Mode Competition in Relativistic Magnetrons and Injection Locking in KW Magnetrons // *AIP Conference Proceedings*. 2003. Vol. 691, No. 1. P. 301.
7. Zheng Q., Bi L., Li H. and Shen D. Suppression of Mode Competition in High-efficiency Phase-locking between High-power Magnetrons // *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Chengdu, China. P. 1–4.
8. Gritsunov A.V. On Spectral Modeling of Microwave Devices // *Telecomm. and Radio Engineering*. 2001. Vol. 55, No. 8. P. 98–102.
9. Gritsunov A.V. On a spectral approach to simulation of microwave devices // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2004. Vol. 49, No. 7. P. 829–832.
10. Hockney R.W., Eastwood J.W. *Computer Simulation Using Particles* / R.W. Hockney. McGraw-Hill, Inc., 1981. 562 p.
11. Vasyanovich A.V., Gritsunov A.V., Nikitenko A.N., Horunzhii M.O. General principles of spectral modeling of microwave devices // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2003. Vol. 60, No. 1-2. P. 88–99.
12. Bilotserkivska A.I., Bondarenko I.M., Gritsunov A.V., Babychenko O.Yu., Sviderska L.I., Vasianovych A.V. Decomposition of electromagnetic potentials in partial functions of dispersive electrodynamic lines // *Ukrainian J. of Physics*. 2024. Vol.69, No. 6. P. 382–394.
13. Gritsunov A.V. Methods of calculation of nonstationary nonharmonic fields in guiding electrodynamic structures // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2007. 52, No. 6. P. 601–616.
14. Gritsunov A.V. About simulation of fields in large particles model // *Proc. 1997 SBMO/IEEE MTT-S Int. Microwave and Optoelectronics Conf.* 1997. Vol. 2, Natal (Brazil). P. 517–519.
15. Carter R.G. *Microwave and RF Vacuum Electronic Power Sources* / R.G. Carter. Cambridge Univ. Press, 2018. 808 p.
16. Tsimring S.E. *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics* / S.E. Tsimring. Wiley-Interscience, 2006. 574 p.
17. Marple S.L., Jr., *Digital Spectral Analysis with Applications*. / S.L. Marple, Jr. Prentice-Hall, Inc. 1987. 492 p.
18. Gritsunov A.V., Turenko L.Y. Harmonic decomposition of an exciting current in simulation of the electron devices // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2002. Vol. 58, No. 11–12. P. 56–67.
19. Chernousov Y., Novel high power pulsed mode operation of commercial continuous-wave magnetron / *IEEE Trans. on Electron Devices*. 2023. Vol. 70, no. 2. P. 826–829.
20. Грицунов О.В. Збудження електромагнітних коливань довільного спектрального складу замкненими електронними потоками в системах зі схрещеними полями : дис. ... д-ра фіз.-мат. наук: 01.04.04. Харків, 2006. 374 с.

Надійшла до редколегії 27.09.2025

Відомості про авторів:

Бондаренко Ігор Миколайович – д-р фіз.-мат. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувачий кафедрою мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: ihor.bondarenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3907-6785>

Гнатенко Олександр Сергійович – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувачий кафедрою фізичних основ електронної техніки, Україна; e-mail: oleksandr.hnatenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7722-0923>

Грицунов Олександр Валентинович – д-р фіз.-мат. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: alexander.gritsunov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2258-4006>

Пашченко Олексій Георгійович – канд. фіз.-мат. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: olexiy.pashchenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8927-3811>

Бендеберя Геннадій Миколайович – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: hennadii.bendeberia@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0070-4927>

Копоть Михайло Андрійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувачий навчальною лабораторією кафедри програмної інженерії, Україна; e-mail: mykhaylo.kopot@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7163-8904>

Гришков Святослав В'ячеславович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Україна; e-mail: sviatoslav.hryshkov@nure.ua.