

ВИБІР МОДЕЛІ ОПИСУ МЕХАНІЗМІВ ЗБУДЖЕННЯ Й ПІДТРИМАННЯ ІОННИХ КОЛИВАНЬ У ПРИЛАДАХ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ПОЛЯМИ

Проблема підвищення чутливості, а також стабільності роботи приладів надвисоких частот залишається однією з найважливіших у сучасній радіофізиці.

Однією з базових умов для задовільнення безперервно зростаючих вимог у радіозв'язку є можливість сумісності служб в одних і тих же діапазонах частот, тобто забезпечення відсутності взаємних завад між різноманітними службами.

Джерелом взаємних завад є не тільки радіозасоби, що працюють на близьких частотах, але й їх позасмугові та бічні випромінювання, а також засоби радіопротидії. При цьому треба враховувати безперервне зростання потужностей передавачів та підсилення антен. У результаті вдосконалення конструкцій магнетронів, клістронів, ЛБХ та інших типів генераторних приладів потужність передавачів за останні роки збільшилася в десятки разів.

У зв'язку з усіма переліченими вище проблемами вивченню питань, що пов'язані з дослідженням бічних коливань в електровакуумних приладах надвисоких частот (ЕВП НВЧ), останнім часом приділяється велика увага. Стає очевидним, що при розв'язанні питань застосування тих чи інших електронних приладів у конкретній радіоелектронній системі потужність та частотний спектр бічних коливань мусять обов'язково враховуватися.

Однак існують деякі складності теоретичного аналізу бічних коливань та їх впливу на основні параметри приладів, тому що такий аналіз має ґрунтуватися на нелінійній теорії взаємодії електронних потоків з різноманітними електромагнітними полями. Зараз немає достатньо розробленої теорії навіть для магнетронів класичного виконання, не кажучи вже про коаксіальні та обернено-коаксіальні магнетрони. Відомо, що в більшості випадків причини виникнення бічних коливань досить загальні для всіх електровакуумних приладів, але прояв їх залежить від конкретного типу приладу. Тому в радіоелектроніці НВЧ останнім часом велику увагу приділяють параметрам, які характеризують чистоту спектра коливань, що генеруються, підсилюються або перетворюються [1—4]. Спектр частот на виході приладу НВЧ обов'язково містить, крім основного коливання, ще й бічні коливання на частотах, котрі знаходяться як в необхідній смузі

частот, так і поза її межами (позасмугові коливання). Потужність цих коливань на кілька порядків менша від потужності основного коливання, однак в сучасній потужній станції завада може досягати рівня десятків кіловат.

Незважаючи на відносно невелику потужність бічних коливань, вони стають неприпустимими при використанні НВЧ-генераторів у сучасних радіолокаційних системах. Зокрема, їх рівень потрібно суттєво знижувати в радіосистемах, передача інформації в яких пов'язана з реєстрацією доплерівського зсуву частоти електромагнітних сигналів. Під час роботи апаратури НВЧ в імпульсному режимі наявність коливань на бічних частотах спотворює форму сигналу, що в багатьох випадках є неприпустимим.

У той же час потужність та кількість радіопередавальних пристроїв має тенденцію до зростання, а чутливість радіоприймальних пристроїв підвищується. Викликані цим ненавмисні завади можуть призвести до помилок у роботі радіонавігаційної апаратури, порушень або спотворень зв'язку, до появи помилкових цілей на екранах радіолокаторів, помилкового спрацьовування слідкуючої та контролюючої апаратури та шкідливого впливу на людський організм [5].

Певну зацікавленість у розробників та дослідників потужних генераторних приладів викликає вдосконалення методів аналізу коливальних процесів складної форми з метою вивчення фізичних причин виникнення бічних коливань в них, а також вимірювання потужності на частоті цих коливань.

До сучасних передавачів, де як активні елементи використовуються електронні прилади, висуваються жорсткі вимоги за припустимою потужністю бічних коливань.

Для всіх електронних приладів НВЧ-діапазону є характерним нелінійний процес взаємодії носіїв заряду з електромагнітним полем. Він призводить до появи в спектрі генерації гармонік робочої частоти та гармонік інших частот, що виникають в приладі, а також комбінаційних складових, які характерні для багаточастотної взаємодії. Нелінійність взаємодії — основне джерело найінтенсивніших складових у спектрі бічних коливань. Отже, усі електронні прилади НВЧ мають у вихідному спектрі бічні коливання.

Однак факторів, які викликають бічні коливання, досить багато, й виявляються вони індивідуально залежно від електричних та геометричних параметрів простору взаємодії, конструктивних параметрів конкретних НВЧ-приладів.

Несфазований рух окремих заряджених частинок за складними траєкторіями з прискоренням є джерелом шумоподібних випромінювань. Останні можуть суттєво перевищувати за густиною коливання, які зумовлено такими механізмами шуму, як дробовий, пе-

рехідний, струморозподіл та ін. Тому можна припустити, що в приладах М-типу шум мусить бути більшим, ніж в приладах О-типу.

За наявності власних коливань носіїв заряду виникає паразитна амплітудна та частотна модуляція електронного потоку в просторі взаємодії, що призводить до небажаного збагачення спектра за рахунок додаткових складових частот.

Бічні коливання й додаткові складові у спектрі частот електронних приладів НВЧ можуть виникнути також завдяки нестабільності робочих напруг, нестабільності частоти генераторів, неузгодженості ВЧ-тракту.

У науковій літературі немає вичерпного аналізу сукупності факторів, які пов'язано з виникненням неосновних коливань. До такого роду коливань належать коливання, які виникають завдяки наявності іонів залишкових газів у робочому просторі взаємодії приладів М-типу.

Відомо, що на стадії виготовлення та зберігання деталі вакуумних приладів адсорбують у своєму об'ємі "технологічні" гази, які змінюють вакуумний стан готового виробу.

До цього часу немає скільки-небудь задовільного теоретичного опису роботи електровакуумних приладів за наявності в них залишкових газів, тим більше немає такої теорії для ЕВП НВЧ М-типу. У деяких роботах [6—10] лише містяться застереження, що іони залишкових газів можуть впливати на роботу електровакуумних приладів. Інші літературні джерела, які присвячено вивченню різноманітних плазмових нестійкостей [7; 11—17], описують деякі механізми, що можуть існувати й в електровакуумних приладах, але тільки з точки зору розгляду їх частот. Існує група робіт [18—20], де в загальних рисах показано, які типи механізмів бічних коливань можуть існувати в ЕВП НВЧ.

Таким чином, аналіз стану проблеми в цілому призводить до висновку щодо необхідності додаткових та більш детальних досліджень впливу парціальних тисків залишкових газів на роботу магнетронів й виникнення бічних коливань, які зумовлено іонами цих газів.

У міру розширення області застосування магнетронів у системах зв'язку та доплерівських РЛС до них висуваються підвищені вимоги з поліпшення характеристик приладів. Перш за все це стосується спектральної чистоти та мінімального рівня шумів у доплерівському діапазоні частот [21; 22].

Добре відомо, що магнетрони генерують шуми в досить широкому діапазоні частот [18]. Однак до цього часу механізми генерації шуму не були повністю вивчені. Відносно цих механізмів вважають,

що різноманітні причини впливають складним чином одна на одну, і це ускладнює аналіз.

У будь-якому електровакуумному приладі, в тому числі в приладах М-типу, існує залишкова атмосфера. Дослідження механізмів шумів або бічних коливань, які зумовлено наявністю в приладах М-типу залишкових газів, пов'язано з вивченням та ідентифікацією спектра випромінювання.

У магнетроні, який працює, молекули залишкових газів іонізуються і в приладі утворюється двокомпонентна плазма. Наявність схрещених електричного та магнітного полів, а також інтенсивних електромагнітних коливань в обмеженому об'ємі призводить до збудження власних коливань плазми й нелінійної взаємодії останніх з полем коливання, що генерується магнетроном. Критерій обмеженості об'єму плазми (для простоти вважаємо, що плазма займає весь об'єм простору взаємодії магнетрону) та інтенсивності взаємодії з електромагнітною хвилею можна визначити згідно з [7]:

$$a \ll \lambda_0, \quad (1)$$

де a — лінійний розмір простору взаємодії; λ_0 — довжина хвилі;

$$E^2 \ll mkT_e \omega_0 e^2, \quad (2)$$

де E — напруженість електричного поля хвилі; m , e — маса та заряд електрона; k — стала Больцмана; T_e — температура електронів; ω_0 — колова частота коливань магнетрона.

Для магнетрона, що досліджується, це дає відповідно: $0,5 \text{ мм} \ll 25 \text{ мм}$ та $6 \text{ МВ}^2/\text{м}^2 > 5 \text{ МВ}^2/\text{м}^2$. Звідси випливає, що в магнетроні, який працює, умова (2) не виконується; отже, мають місце сильний вплив електричного поля хвилі на плазму й нелінійна взаємодія останньої з хвилею.

Плазмові ефекти можуть і не виявлятися в "чистому" вигляді, наприклад при випромінюванні на характерних для плазмових нестійкостей частотах. Залежно від конкретних умов це може бути й збагачення спектра коливань електронної хмари, й внесення турбулентностей в її стан, й бомбардування електродів, й зміна умов формування високочастотних струмів тощо.

Особливість проведених теоретичних та експериментальних досліджень, які описано в працях [11—15], полягає в тому, що коливання плазми досліджувалися без урахування фактора взаємодії електронного потоку з полем біжучої хвилі й хвилі сповільнюючої системи, що має місце в умовах робочого режиму приладів.

У реальних умовах робота приладу характеризується полігармонічним режимом, коли в спектрі випромінювання налічується низка дискретних частот, що зумовлено як низькочастотними та високочастотними

стотними процесами в хмарі просторового заряду з плазовими нестійкостями, так і синхронною взаємодією полів у сповільнюючій системі з електронним потоком.

У працях останнього часу [18—20] наведено додаткові експериментальні дані щодо виявлення іонних коливань у робочому режимі магнетронів через наявність у них різноманітних газів з близькими до реальних парціальними тисками.

У [18; 19] подано опис експериментально виявлених іонно-релаксаційних та плазових коливань, які є причиною шумів магнетронів у діапазоні частот від мегагерц до кількох сотень мегагерц. За робочу гіпотезу вибрано припущення щодо взаємодії іонних коливань з електронними коливаннями хмари просторового заряду.

Низькочастотні коливання іонного походження в приладах М-типу обов'язково трансформуються в коливання на комбінаційних частотах $f_0 \pm F_0$, де f_0 — частота бічного коливання за рахунок нелінійних властивостей системи "електромагнітна хвиля — електронний потік".

Крім коливань, які зумовлено наявністю залишкових газів, у магнетроні мусять існувати коливання електронної хмари, котрі не залежать від властивостей сповільнюючої системи.

З викладеного вище стає зрозумілим, що необхідні теоретичний опис та дослідження механізмів збудження й підтримки бічних коливань, зумовлених наявністю залишкових газів у приладах.

Коливання плазми та електронні коливання можуть існувати незалежно від властивостей системи, але можуть безпосередньо або параметрично взаємодіяти з хвилями у сповільнюючій системі. В обох випадках вони роблять внесок у спектр генерації магнетрона. Крім того, іони залишкових газів змінюють провідність простору взаємодії, впливаючи тим самим на вихідні характеристики приладу. В той же час коливання плазового походження та електронні коливання, взаємодіючи одне з одним, збагачують спектр частот магнетрона.

У міру розширення області застосування магнетронів в інформаційних системах та системах промислового нагрівання до них висуваються підвищені вимоги за низкою параметрів, зокрема, до спектрального складу коливань, що генеруються.

З вивченням природи спектрального складу сигналу, який генерується магнетроном, тісно пов'язане вивчення аномально високого рівня шуму в ньому (тут під шумом розуміються як випадкові, так і дискретні електромагнітні коливання). В літературних джерелах не знайдено досить повного опису впливу цих газів на роботу приладів М-типу, тому далі теоретично досліджено вплив парціальних тисків залишкових газів на характеристики та параметри електровакуумних приладів НВЧ, щоб пояснити виникнення шумів у спектрі магнетрона.

Вихідними даними при математичному описі мають бути: геометричні розміри магнетронів, напруженості електричних та магнітних полів й тиск залишкових газів. Використовуючи вихідні дані, математична модель повинна описувати: механізм збудження бічних коливань — БК (ними вважаємо будь-які коливання, крім основного), який зумовлено тиском залишкових газів; взаємодію БК з основним коливанням; вплив залишкових газів; на вихідний спектр та характеристики магнетрона.

Теоретично вплив тиску залишкових газів на роботу магнетронів можна розглядати з різних точок зору. В [6] зауважено, що найдоцільніше вивчати спектральний склад коливань приладів М-типу з точки зору амплітудної та частотної модуляції.

Радіотехнічний розгляд припускає, що в магнетроні, який генерує, крім основного коливання існують коливання плазмового походження в схрещених полях (у першому наближенні можна вважати, що їх джерелом є циклотронні та плазмові коливання іонів залишкових газів та електронів й іонно-релаксаційні коливання) і електронні коливання хмари просторового заряду (радіально-симетричні, азимутальні та аксіальні коливання).

Більш точний опис процесів, що мають місце в магнетроні, можна провести з використанням моделі самоузгодженого поля, яка зводиться до розв'язання самоузгодженої задачі для простору взаємодії, що заповнений активним середовищем (електронами та іонами). При розв'язанні цієї задачі звичайно виділяють два етапи: процес збудження коливальної системи магнетрона; дослідження поведінки активного середовища під дією самоузгодженого поля в просторі взаємодії.

Цим етапам відповідають дві групи основних рівнянь електроніки НВЧ: рівняння поля і рівняння руху. Самоузгодженість задачі забезпечується сумісним розв'язанням рівнянь поля та рівнянь руху.

Для дослідження процесів, які мають місце в нерівноважному середовищі (просторі взаємодії магнетрона) у загальному вигляді використовують рівняння Больцмана.

Миттєвий стан системи частинок під час використання кінетичної моделі можна схарактеризувати за допомогою функції розподілу цих частинок.

У НВЧ-електроніці електронні потоки, що розглядаються, надто далекі від стану статичної рівноваги, а час руху електронів через прилад малий порівняно з ефективним часом співударів, тому індивідуальна взаємодія частинок (зіткнення) не враховується, й під час теоретичного аналізу беруть до уваги тільки колективну взаємодію. При цьому з урахуванням сили Лоренца рівняння Больцмана перетворюється в рівняння Власова. За відомими напруженостями електричного та магнітного полів визначають функцію розподілу,

а за нею — густину просторового заряду та густину струму. Підстановка останніх у рівняння Максвелла дає значення для напруженостей електричного та магнітного полів.

Критерієм правильності розв'язання є отримання при цьому таких же значень напруженості поля, які використовувалися в рівнянні Власова як вихідні дані.

Усі моделі, які розглянуто (радіотехнічна, самоузгодженого поля, кінетична), дозволяють теоретично вивчати вплив парціального тиску залишкових газів на роботу магнетонів у режимі генерації.

Радіотехнічна (модуляційна) модель розглядає незалежно один від одного кожний з механізмів виникнення бічних коливань, а також взаємодію їх між собою й основним коливанням магнетрона. Математично ця модель описується рівняннями, котрі прості щодо розв'язання.

Модель самоузгодженого поля, як і кінетична модель, розглядаючи всю сукупність заряджених частинок, не дозволяє розглянути кожний з механізмів збудження бічних коливань. Математично обидві ці моделі описуються досить складними диференціальними рівняннями з багатьма змінними. Методи розв'язання таких рівнянь достатньо не розроблено, а ті методи, що існують, дозволяють отримати розв'язання за надто ідеалізованих наближень. Методи чисельного розв'язання цих рівнянь також розроблені мало й потребують багатьох спрощень та створення найекономічніших алгоритмів розрахунків.

Зі згаданого вище випливає, що найбільш прийнятною моделлю є модуляційна.

Але модуляційна модель не буде адекватною, якщо не з'ясувати, яким чином статичне магнітне поле впливає на характеристики залишкових газів.

У магнетроні магнітне поле подовжує траєкторію руху електронів у просторі взаємодії. Отже, наявність магнітного поля еквівалентна збільшенню тиску газу. Еквівалентний тиск за наявності магнітного поля

$$p = p_0[1 + (\omega_H + t_e)^2]^{1/2},$$

де p_0 — робочий тиск за відсутності магнітного поля; ω_H — циклотронна частота; t_e — час між зіткненнями електрона з атомами залишкових газів [23].

З фізики плазми відомо, що частота зіткнень електронів з іонами залишкових газів визначається за формулою

$$\frac{1}{\tau_e} = \nu_{ei} = 4\sqrt{2\pi/3}(Z^2 e^4 n_A / m^{1/2} T_e^{3/2}).$$

Тут Z — заряд іона, що утворився; $\Lambda = r_{0e}/r_{\min}$; де r_{0e} — радіус Дебая; $r_{\min} = e^2/kT$ [7].

Отже, статичне магнітне поле підвищує еквівалентний тиск в електровакуумних приладах М-типу.

Відомо, що при виробництві електровакуумних приладів відкачування провадиться до тиску 1,3 нПа, при цьому еквівалентний тиск, який визначається за згаданою вище формулою, становить 13 мкПа. Для тих типів магнетронів, які було досліджено, зміна тиску залишкових газів у межах 1,3 нПа ... 13 мкПа дає еквівалентний тиск близько 13 мкПа. При подальшому підвищенні тиску залишкових газів рівень робочого тиску збігається з рівнем еквівалентного тиску. Отже, під час розрахунків можна користуватися робочим тиском, починаючи з 13 мкПа.

Таким чином, спираючись на модуляційну модель і враховуючи сильний вплив електричного поля хвилі на плазму, нелінійну взаємодію останньої з хвилею, а також вплив статичного магнітного поля, є сенс дослідити механізми збудження та підтримання іонних коливань у приладах зі скрещеними полями.

Список літератури: 1. Бецкий О.В., Палатов К.И., Цейтлин М.Б. Исследование побочных колебаний в электронных приборах СВЧ // Радиотехника и электрон. 1978. № 9. С. 1904—1914. 2. Бецкий О.В., Гайдук В.И., Палатов К.И. Анализ спектра сигналов в приборах СВЧ со скрещенными полями. Электромагнитная совместимость // The sixth Intern. Wroclaw symp. on electromagnetic compatibility. Wroclaw, 1982. Vol. 1. P. 57—66. 3. Побочные колебания в электронных приборах СВЧ / О.В. Бецкий, К.И. Палатов, М.Б. Цейтлин, Ю.Д. Ильин; Под ред. М.Б. Цейтлина. М.: Радио и связь, 1984. 152 с. 4. Уайт Д.Р.К. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и преднамеренные помехи: В 2 т. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1977. Т. 1. 348 с. 5. Sachs H.M. Electromagnetic compatibility measurements // Electronic industries. 1965. N 7. P. 106—110. 6. Ashley J.R., Searles C.B., Palka F.M. The measurement of oscillator noise at microwave frequencies // IEEE trans. on microwave theory and techniques. 1967. MTT-16, N 9. P. 735—760. 7. Геккер И.Р. Взаимодействие сильных электромагнитных полей с плазмой. М.: Атомиздат, 1976. 312 с. 8. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973. 400 с. 9. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями: В 2 т. / Пер. с англ. под общ. ред. М.М. Федорова. М.: Изд-во иностр. лит. Т. 1. Основные элементы приборов. 1961. 456 с. 10. Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В. Волноводные и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1962. 335 с. 11. Экспериментальное исследование распадной неустойчивости плазмы в скрещенных полях / В.И. Фареник, В.В. Власов, А.М. Рожков, А.А. Кожарин // ЖТФ. 1974. Т. 44, № 8. С. 1788—1789. 12. Параметрические неустойчивости неоднородной плазмы в скрещенных полях / В.В. Власов, В.И. Панченко, А.М. Рожков и др. // ЖТФ. 1975. Т. 45, № 5. С. 986—993. 13. Экспериментальное исследование кинетических неустойчивостей в альтернативном магнетроне Габора / В.И. Фареник, В.В. Власов, А.М. Рожков и др. // ЖТФ. 1972. Т. 42, № 8. С. 1625—1628. 14. Экспериментальное исследование разряда с накаленным катодом в скрещенных полях / В.И. Фареник, В.В. Власов, А.М. Рожков и др. // ЖТФ. 1973. Т. 43, № 10. С. 2061—2065. 15. Кервалишвили Н.А., Жаринов А.В. Характеристики разряда низкого давления в поперечном магнитном поле // ЖТФ. 1962. Т. 35, № 12. С. 2194—2201. 16. Бархударов Э.М., Кервалишвили Н.А., Кортонджая В.Г. Неус-

тойчивость анодного слоя и электроны аномально большой энергии в разряде низкого давления в поперечном магнитном поле // ЖТФ. 1972. Т. 42, № 9. С. 1904—1908. 17. *Veleff V., Raev A.* Instabilities and D.C. characteristics of a low-pressure gas-discharge magnetron with cold cathod // Bulg. j. phys. 1976. Vol. 3, N 1. P. 85—91. 18. *Experimental study of noise generated by magnetrons for microwave ovens* / K. Yamamoto, T. Kuronuma, T. Koinuma, N. Tashiro // J. of microwave power. 1981. Vol. 16, N 3—4. P. 271—276. 19. *Saito H., Kume M., Kawaguchi T.* Improvement of performance of magnetron for microwave oven // Toshiba rev. 1982. Vol. 37, N 9. P. 768—771. Jap. 20. *Fujii Y., Ohbayashi S.* Effects of vacuum pressure and electrode structure on instability in high-current electron beam tube // Денсі цусін гакакэй ромбун сі. 1981. Т. С-64, N 9. С. 524—529. Яп. 21. *Зиньковский В.Н., Никитенко А.Н.* Изучение влияния остаточной атмосферы на процессы генерации колебаний в скрещенных полях // Радиотехника. 1985. Вып. 72. С. 32—34. 22. *Зиньковский В.Н., Никитенко А.Н., Чупров Ю.Ю.* О влиянии остаточных газов на шумы магнетронного генератора // Там же. 1986. Вып. 77. С. 68—72.

*Харківський державний технічний
університет радіоелектроніки*

Надійшла до редколегії 14.01.98