

Г. Д. КРАЖАН

РОБОТА ЛБХ О-ТИПУ В КРЕСТАТРОННОМУ РЕЖИМІ

В ЛБХ О-типу режими роботи при великих b мають важливе значення, особливо в підсилювачах потужності. При великих значеннях параметра несинхронності спостерігається режим підсилення, обумовлений інтерференцією хвиль із сталою амплітудою. З точки зору кінематичної теорії [5] можливість роботи при великих значеннях параметра розсинхронізму пов'язана з тим, що електронна потужність взаємодії із зростанням відносного кута прольоту Φ_0 пульсує; в тих областях значень Φ_0 , де $P_{ea} < 0$, принципово можлива взаємодія пучка з хвилею.

Досліджуючи роботу ЛБХ при низьких рівнях, Компфнер виявив зрив коливачів (нульове підсилення) при певних значеннях струму та напруги прискорення, що дало можливість розрахувати опір зв'язку та фазову швидкість хвилі в системі [6]. Джонсон [7] узагальнив ці результати, застосувавши теорію Пірса, проте ці автори не розглянули це явище детальніше, хоч Компфнер відмітив, що воно спричиняється інтерференцією хвиль. Багато аспектів роботи ЛБХ типу О та приладів типу М можна з'ясувати інтерференцією хвиль. Важливе значення для побудовання потужних підсилювачів мають експериментальні результати Колдуелла та Хоха [1]. Найбільші значення к. к. д. були при напругах пучка, відповідних $b > b_{x_1=0}$ при великих вхідних потужностях, що якісно відповідає теорії Нордсіка [2] (рис. 1). Цих значень можна досягти лише при малому підсиленні.

Аналізуючи експериментальні результати Колдуелла та Хоха, Роу припустив, що ці та подібні явища добре пояснюються інтерференці-

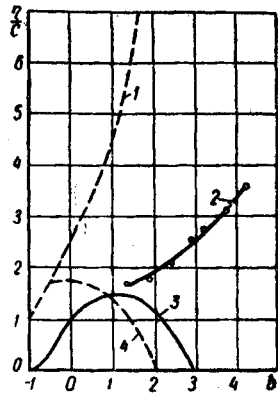


Рис. 1. Залежність значень η/C експериментальних і розрахованих за теорією Нордсіка:

1 — η/C за Нордсіком: $C = 0,1; QC = 0; d = 0$; 2 — експериментальне η/C : $C = 0,1; QC \sim 0,25; d \sim 0,02$; 3 — розраховане x_1 : $C = 0,1; QC = 0,25; d = 0,025$; 4 — розраховане x_1 : $C = QC = d = 0$.

єю трьох парціальних хвиль, які поширюються вздовж сповільнюючої системи [11]. Виходячи з цих припущень, Роу розробив лінійну та нелінійну теорію і сконструював експериментальний прилад — крестатрон.

Лінійна теорія крестатрона

В основу аналізу покладена теорія Пірса для $b > b_{x_1=0}$. Тут розв'язкам характеристичного рівняння відповідають три уявні корені y_1 , y_2 та y_3 , що приводить до виникнення трьох хвиль сталої амплітуди, які рухаються з різними швидкостями. При інтерференції між собою хвилі утворюють повне поле із змінними мінімумами та максимумами.

При точному синхронізмі розщеплення входного сигналу відбувається так, що парціальні

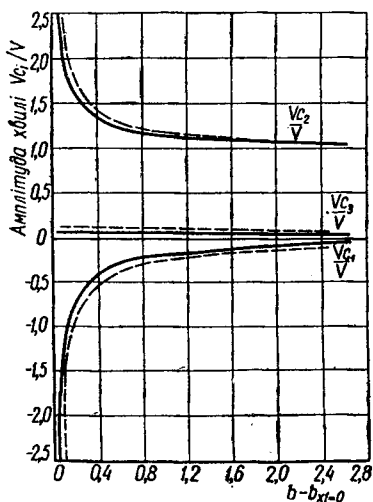


Рис. 2. Нормалізовані амплітуди парціальних хвиль у функції швидкості ін'єкції ($C = 0,1$; $d = 0$):
 --- $QC = 0$; — $QC = 0,125$.

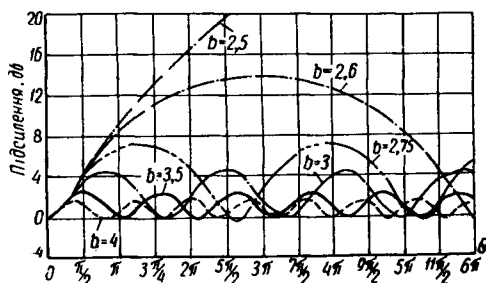


Рис. 3. Підсилення у функції довжини ($C = 0,1$; $QC = 0,25$; $d = 0$; $b_{x_1=0} = 2,57$).

сигнали V_1 , V_2 , V_3 однакові і мають ту ж фазу, що й основний сигнал. При $b \geq 0$ розщеплення сигналу складніше. Вхідний сигнал розщеплюється на три хвилі, що відрізняються одна від одної фазою. В міру зростання b фазовий зсув між парціальними хвилями зростає, амплітуди двох хвиль збільшуються, а третьої зменшується. При b , близьких до 2, амплітуда двох парціальних хвиль може перебільшувати вхідний сигнал, і фазовий зсув досягає 180° . Із зростанням b амплітуди двох парціальних хвиль зменшуються, а третьої — залишається незмінною, фазовий зсув теж лишається незмінним (рис. 2). Поширюючись вздовж лампи з різними фазовими швидкостями, ці хвилі утворюють стоячу хвилю.

У точках максимуму амплітуда повного поля перевищує вхідний сигнал. Підбираючи довжину лампи, або b , досягнемо підсилення входного сигналу. На рис. 3 наведена залежність $G = G(\theta)$.

При фіксованому b коефіцієнт підсилення G пульсує із збільшенням довжини лампи; для $b \approx 2,6$ підсилення може досягти значних величин. При зростанні b підсилення також пульсує, прилад стає коротшим, максимальна величина підсилення падає і при $b \rightarrow \infty G \rightarrow 0$. Для наведеного випадку довжина дорівнює приблизно шести уповільненим довжинам хвиль. Оптимальна довжина $CN = \frac{\theta}{2\pi} = \frac{0,25}{(\Delta b)^{1/2}}$, де $\Delta b = b - b_{x_1=0}$. Підсилення можливе і при негативних b , для яких $x_1 = 0$. При нульових втратах усі максимуми кривої підсилення приблизно однакові, але при наявності втрат перший максимум найбільший, так що для найкоротшої довжини завжди бажано працювати на першому максимумі кривої підсилення.

Із зростанням параметра підсилення C оптимальна довжина зменшується, а підсилення збільшується. Найбільш досяжна величина C залежить від частоти і типу сповільнюючої системи. Якщо C стала величина, то абсциса рис. 3 пропорційна частоті і ширина смуги частот на рівні 3 дБ дорівнює 3 : 1.

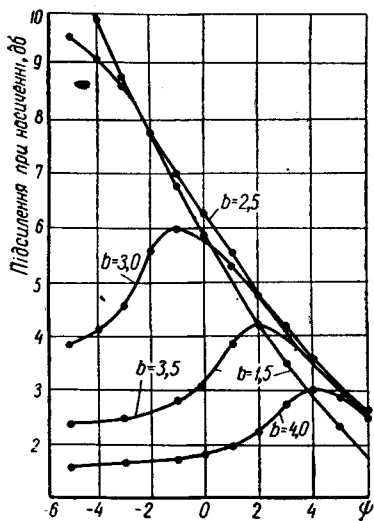


Рис. 4. Теоретичне підсилення при насиченні у функції рівня вхідного сигналу ($C = 0,1$; $QC = 0,125$; $b = 1$; $d = 0$; $b_{x_1=0} = 0,57$).

Нелінійний режим роботи

Праці, виконані Рой [3], [11], дозволяють виявити характерні риси підсилувачів крестатронного типу, що працюють у режимі

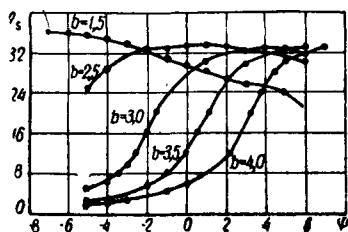


Рис. 5. Теоретичний к.к.д. у функції рівня вхідного сигналу ($C=0,1$; $QC=0,125$; $b = 1,0$; $d = 0$; $b_{x_1=0} = 2,33$).

великого сигналу. Із зміною довжини лампи підсилення має пульсуючий характер, досягаючи більш-менш придатних величин, коли рівень вхідного сигналу істотно порівнюваний з $CI_0 V_0$. Підсилення зменшується в міру зростання рівня збудження, але вихідна потужність та коефіцієнт корисної дії зростають із збільшенням рівня збудження (рис. 4 і 5). Для дуже високих рівнів збудження підси-

лення невелике і відносно незалежне від швидкості ін'єкції. Слід зауважити, що оптимальна довжина (з точки зору максимальної вихідної потужності) змінюється при зміні рівня збудження. Коефіцієнт корисної дії зростає із збільшенням рівня збудження, приводячи до відносно високих значень коефіцієнта корисної дії для крестатрона. Для високих рівнів збудження коефіцієнт корисної дії досягає значень, відносно незалежних від b .

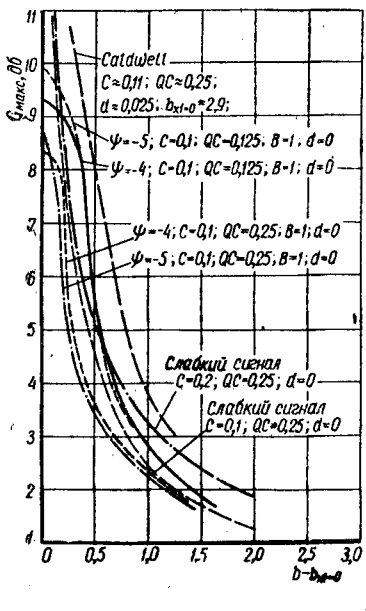


Рис. 6. Порівняння теоретичного та експериментального підсилення.

Теоретичні дослідження дозволили з'ясувати та одержати добру відповідність результатам Колдуелла і Хоха [1] (рис. 6).

Невелика довжина крестатрона дає можливість побудувати прилад із слабким електромагнітним фокусуванням; іноді можливе застосування електростатичного фокусування.

Експериментальний крестатрон

Роу збудував та випробував кілька експериментальних ламп 10 см діапазону. Для сповільнючої системи застосовували спіраль. Останню брали з лампи із зростаючою хвилею і скорочували відповідно до розрахунків за теорією слабого сигналу. Електронна гармата мала помірний первеанс; в лампі використовували електромагнітне фокусування.

Для слабого сигналу був досягнутий високий коефіцієнт підсилення ($G \sim 8 \div 12$ дБ); ширина смуги частот була близькою до октави ($C = 0,095$; $QC = 0,185$; $\rho_\mu = 0,6$ на $3,0$ ГГц) [12]. При високих значеннях потужності збудження підсилення знижується до 3—6 дБ, хоч потужність при насиченні збільшується. При високих рівнях збудження вихідна потужність експериментальної лампи наближалась до 130 вт з підсиленням 6 дБ, що дає перетворений коефіцієнт корисної дії порядку 20% для електронного пучка з первеансом $0,6 \cdot 10^{-6}$.

В експериментальних лампах не вдалось досягнути такого високого коефіцієнта корисної дії, який дає теорія. Відповідність теоретичних та експериментальних результатів ускладнюється через труднощі, з якими зустрічаються при точному визначенні C і QC . Для досягнення найбільшого перетвореного коефіцієнта корисної дії та вихідної потужності бажані низькі значення параметр-

ра об'ємного заряду ($QC = 0,1 \div 0,2$). Підвищення коефіцієнта корисної дії досягають застосуванням фазового фокусування. При цьому к. к. д. може бути порядку 50% у широкій смузі частот.

У вихідних каскадах передавача, де вимоги до потужності живлення суворі і дуже бажаний високий коефіцієнт корисної дії, зручно застосовувати лампу з високим коефіцієнтом корисної дії, широкою смугою частот, невеликою довжиною і без атенюатора. Можна збудувати малопотужні ступені з високим підсиленням, де значний коефіцієнт корисної дії не відіграє значної ролі, а від вихідної лампи вимагати тільки середнє підсилення. Вихідною лампою може бути крестатрон.

Підвищення потужності будь-якої лампи пов'язане з проблемою забезпечення відповідного охолодження сповільнюючої системи. Спіраль широкосмугова, але не здатна розсіювати велику потужність, тому що охолоджується лише за рахунок випромінювання. Деяке поліпшення досягається використанням охолодження через керамічні опори до зовнішньої металевої вакуумної оболонки. При використанні спіралі у високовольтній потужній ЛБХ необхідно збільшувати діаметр та крок спіралі. При цьому зменшується повний опір основного виду коливань внаслідок зростання потужності просторових гармонік, що приведе до збільшення повного опору просторової гармоніки $n = 1$ і до самозбудження. Цього можна уникнути, використовуючи спіраль із зустрічною намоткою або систему кільцестержнів. Але в короткохвильовій частині сантиметрового діапазону виготовлення таких систем має деякі технологічні та конструктивні труднощі.

Стерженьові та ребристі сповільнюючі системи мають добрий (порівняно із спіраллю) тепловідвід і відносно великі розміри елементів структур. Тому їх використовують у приладах середньої та великої потужності навіть до міліметрового діапазону. Особливий інтерес являють системи типу «гребінка». Вони широкосмугові, мають великий опір зв'язку та пропускають значну високочастотну потужність. Але пристрої узгодження таких систем мають значну протяжність, що зменшує таку перевагу крестатрона, як мала довжина.

У короткохвильовій частині сантиметрового діапазону для сповільнюючих систем електроннопроменевих приладів великої та середньої потужності застосовують переважно діафрагмовані вилеводи. Такі системи відзначаються великою допустимою потужністю розсіяння, механічною міцністю та жорсткістю, а в багатьох випадках і простотою виготовлення. Для крестатронів найбільш придатні сповільнюючі системи, що працюють на основній просторовій гармоніці і являють собою ланцюжок резонаторів з негативним коефіцієнтом взаємодукції («конюшинний лист», ланцюжок резонаторів з S-подібними петлями зв'язку). Смуга одночасно підсилюваних частот у лампах з такими системами становить кілька процентів, але коефіцієнт корисної дії високий внаслідок великого опору зв'язку на основній просторовій гармоніці.

Висновки

1. Крестатрон являє собою модифікований підсилювач біжучої хвилі, який має невелику довжину, середнє підсилення, значний коефіцієнт корисної дії і широку смугу пропускання. Перевагою приладів цього типу є відсутність атенюатора.

2. Невелике підсилення крестатрона не є значною хибобою, тому можна здійснити малопогутжні ступені з високим підсиленням, де високий коефіцієнт корисної дії не відіграє значної ролі, а від вихідного ступеня вимагати невелике підсилення і високий коефіцієнт корисної дії.

3. Для крестатронних підсилювачів короткохвильової частини сантиметрового діапазону найбільш придатними сповільнюючими є системи типу «гребінка» та ланцюжок резонаторів з негативним коефіцієнтом взаємодукції, хоч останні і не дозволяють повною мірою реалізувати переваги крестатрона.

ЛІТЕРАТУРА

1. Колдуэлл Дж. и Хох О. Л., Характеристики мощного усилителя на лампе с бегущей волной, сб. «Лампа с бегущей волной», под ред. В. Г. Овчарова, Госэнергоиздат, 1959.
2. Nordstieck, Theory of large signal behaviour of travelling-wave amplifiers. Proc. IRE, 1953, vol. 41, 5, p. 630.
3. Rowe J. A., Large signal analysis of the travelling-wave amplifier theory and general results. Trans. IRE, 1956, vol. EP-3, 1, p. 39.
4. Цейтлин М. Б., Кач А. М., Лампа с бегущей волной, «Советское радио», 1964.
5. Шевчик В. Н., Основы электроники сверхвысоких частот, «Советское радио», 1959.
6. Kompfner R., On the operation a the travelling-wave tube at low level. J. Brit. IRE, 1950, 10, 8—9, p. 283.
7. Johnson H. R., Kompfner dip condition. PIRE, 1955, 43, 7, p. 874.
8. Пирс Д., Лампа с бегущей волной, «Советское радио», 1952.
9. Стальмахов В. С., Основы электроники сверхвысокоочастотных приборов со скрещенными полями, «Советское радио», 1963.
10. Клеен В., Пешль К., Введение в электронику сверхвысоких частот, «Советское радио», 1963.
11. Rowe J. E., Theory of the crestatron: a forward-wave amplifiers. Proc. IRE, 1959, v. 47, 4, p. 536.
12. Rowe J. E., Konrad G. T., Krage H. W., Experiments on a series of S-band crestatrons. A. I. E. E. Trans. on Comm. and Elect., 51, January, 1961.
13. Rowe J. E. and Brackett C. A., Efficiency, phase shift and power limiting in variable-pitch travelling-wave amplifier. Proc. of National electronics conference, vol. XVIII, 1962.
14. Тараненко З. И., Трохименко Я. К., Замедляющие системы, К., изд-во «Техника», 1965.

G. D. KRAZHAN

«O»-TYPE TWT AS A CRESTATRON

Summary

The survey of the theoretical and experimental results of the investigations of the work of TWT O-type are presented. Various slow wave systems are considered from the point of view of the application in the Crestatron.