

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

ТАРАНЕНКО В. П.

ГІРОПРИЛАДИ

Розглянуто принцип дії та історію створення електронних приладів НВЧ – гіроприладів, оснований на взаємодії електронних потоків з несповільненою електромагнітною хвилею. Гіроприлади вирішили проблему отримання великих потужностей в міліметровому діапазоні хвиль.

В ювілейному виданні журналу слід відзначити роботи, виконані на радіотехнічному факультеті, які зіграли видатну роль в електроніці НВЧ на світовому рівні. Одними з таких є роботи по створенню в 1955–1957 роках фазохронів, що й лягли в основу техніки сучасних гіроприладів.

Гіроприлади базуються на принципі взаємодії з несповільненими електромагнітними хвилями. Відмова від використання сповільнюючих структур складність виготовлення яких в зв'язку з зменшенням розмірів значно збільшується з переходом до міліметрового чи субміліметрового діапазонів, використання як електродинамічних систем взаємодії відрізків регулярних хвилеводів (круглих та прямокутних) з порівняно великими розмірами поперечного перерізу, дозволили вирішити проблему створення в області взаємодії потужних електронних пучків та розсіювання великої потужності.

Рішення цієї проблеми привело до створення в діапазоні міліметрових та субміліметрових хвиль приладів, що дозволяють генерувати великі потужності з високим ККД. Гіроприлади вирішили проблему отримання великих потужностей – сотень кіловатів в тривалому режимі та одиниць мегаватів в імпульсному в міліметровому та субміліметровому діапазонах.

З точки зору фізики традиційних НВЧ-приладів в гіроприладах умова синхронізму електронів з ВЧ-полем виконується внаслідок рівності циклотронної частоти (або її гармонік) та кругової частоти робочої моди електромагнітного поля.

В реальних приладах кругове обертання електрона забезпечується постійним магнітним полем, причому він рухається по спіралі.

Розглянемо умову синхронізму електрона, що рухається по спіралі, з полем біжучої хвилі (рис. 1).

Вздовж осі Z розповсюджується плоска електромагнітна хвиля з швидкістю ϑ_{ϕ} .

$$E_x = E_0 \sin(\omega t - \beta z), \beta = \frac{\omega}{v_\phi} \quad (1)$$

ω – кругова частота хвилі, β – фазова стала, v_ϕ – фазова швидкість.

Електрон обертається в площині $Z = 0$, паралельній фронту хвилі, з круговою частотою Ω по кругу з радіусом r .

$$\begin{aligned} x &= r \cos(\Omega t + \varphi_0) \\ y &= r \sin(\Omega t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (2)$$

Ω – циклотронна частота,

$$\Omega = \frac{l}{m} B, \quad (3)$$

B – величина індукції магнітного поля.

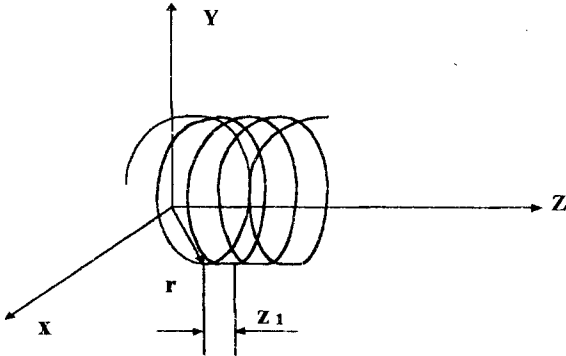


Рис. 1

Шлях, який проходить електрон вздовж осі Z дорівнює $\Omega = v_z t$. За один оберт електрон проходить вздовж Z віддаль Z_1 ,

$$Z_1 = v_z \frac{2\pi}{\Omega}. \quad (4)$$

Для того, щоб електрон весь час знаходився в тій самій фазі відносно ВЧ-поля хвилі, необхідно, щоб за період обертання $T = \frac{2\pi}{\Omega}$, поле змінило фазу на 2π в точці $Z = Z_1$, інакше:

$$\omega t - \beta Z_1 = 2\pi \quad (5)$$

або

$$\omega \frac{2\pi}{\Omega} - \frac{\omega}{\vartheta_{\phi}} \vartheta_Z \frac{2\pi}{\Omega} = 2\pi. \quad (6)$$

Після перетворень отримаємо:

$$\vartheta_Z = \vartheta_{\phi} \frac{\omega - \Omega}{\omega}. \quad (7)$$

Ця залежність і є та умова, за якої електрон, рухаючись по спіралі, не змінює своєї фази відносно поля і весь час взаємодіє з цим полем, гальмівним або прискорюючим. При зустрічному русі хвилі та електрона (взаємодія з зворотною просторовою гармонікою поля), умова взаємодії буде

$$\vartheta_Z = \vartheta_{\phi} \frac{\Omega - \omega}{\omega}. \quad (8)$$

Крім спіральної траєкторії, можуть бути і інші, при яких можливі поперечні рухи електронів, наприклад трохоїда, що буває в схрещених електронному та магнітному полях.

При розглянутому механізмі взаємодії потрібне не гальмування електромагнітної хвилі, а поперечні коливання електронів з частотою Ω , близької до кругової частоти ω .

Для ефективної взаємодії електронів з полем необхідно створити послідовність зарядів (згустків), інакше електронний потік необхідно промодулювати.

В приладах такого типу електрони групуються внаслідок того, що частота обертання електрона в магнітному полі залежить від швидкості:

$$\Omega = \frac{l}{m} B \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}. \quad (9)$$

При цьому суттєвою являється азимутальне групування, обумовлене залежністю циклотронної частоти від кінетичної енергії, в той час як просторове групування грає другорядну роль. Основні закономірності такого групування аналогічні приладам типу «О». Тому прилади типу «О» мають свої аналоги в гіроприладах.

Умови взаємодії [7], [8] електронів з несповільненою хвилею типу TEM вперше в світі встановив С. І. Тетельбаум в 1954 р. [1]. Він же і запропонував шляхи створення приладів НВЧ на цьому принципі. Ці прилади він назвав фазохронами.

Перший діючий фазохрон був збудований К. Я. Ліждвоєм в 1957 р. Електродинамічною структурою в фазохроні використовувалась двопровідна лінія, створена рейками, які поступово переходили в провідники круглого перетину.

Електрони між рейками рухались по трохойдальних траєкторіях. Використовувалось поперечне магнітне поле. Опис робочого макета та результати експериментального дослідження були опубліковані в журналах «Радиотехника и электроника» в 1957 році [2].

Але основний вклад в розвиток теорії та техніки створення сучасних гіроприладів вніс академік А.В. Гапонов із своїми співробітниками в кінці 50-х років. Ними були вирішені два важливих питання:

1) введення релятивістської поправки при визначенні циклотронної частоти дозволило пояснити принцип азимутального групування в гіроприладах [3];

2) використання круглого хвилеводу, робочої моди H_{01} , інжекторної магнетронної гармати призвело до створення оптимальної конструкції гіроприладів.

Всі сучасні гіроприлади базуються на цій конструкції.

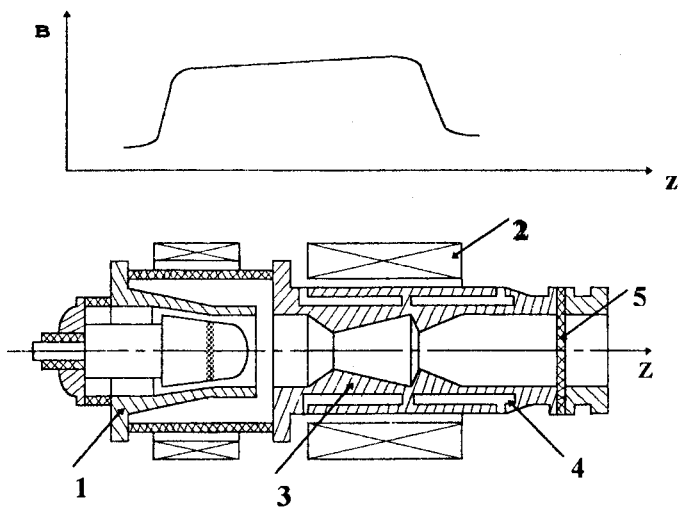


Рис.2

На рис. 2 приведена схема конструкції одного з видів гіроприладів – гіротрона. Електронна гармата 1 формує трубчастий електронний потік з спіральними траєкторіями електронів в потоці.

На рис. 3 зображені траєкторії електронів та розподіл індукції магнітного поля вздовж потоку. Електромагніт 2 забезпечує необхідне магнітне поле в зоні електронної гармати для формування електронного потоку та задає необхідну циклотронну частоту обертання електронів Ω при подальшому рухові їх в зоні взаємодії з височастотним полем в резонаторі 3.

Резонатор переходить в граничний хвилевід з боку електронної гармати для попередження випромінювання електромагнітної енергії в напрямку електронної гармати. Плавність звуження дозволяє попередити трансформацію робочої моди в моди з меншими радіальними індексами та забезпечує як екранування простору формування пучка від попадання ВЧ-енергії, так і повне відбиття робочої моди.

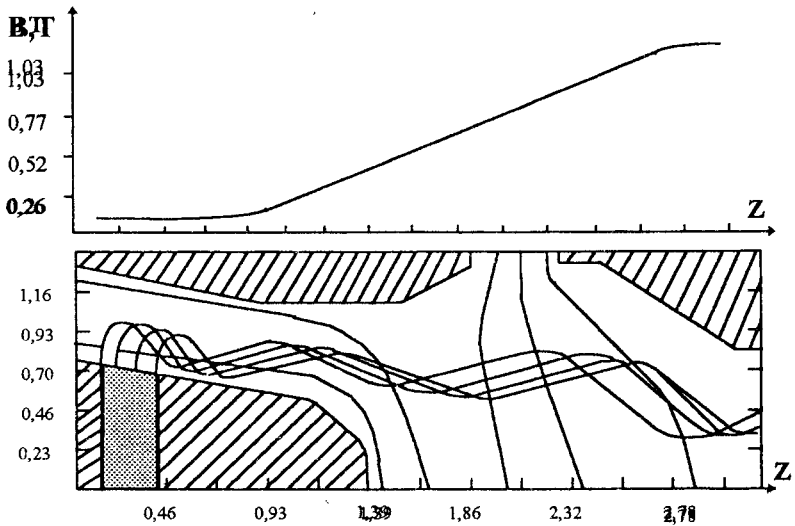


Рис.3

З боку колектора резонатор має плавне звуження, що переходить поступово в циліндричний хвилевід 4, виконуючий одночасно функцію виводу енергії і колектора. Резонатор і колектор мають канали для циркуляції охолоджуючої рідини. В вихідному хвилеводі після охолодженої поверхні колектора розміщується діелектричне вікно виводу енергії 5.

Резонатор розміщується в однорідній частині магнітного поля; по обидва боки від резонатора напруженість магнітного поля достатньо швидко зменшується, що забезпечує формування пучка в катодній області електронної гармати та осідання відпрацьованих електронів на стінки колектора.

В гіроприладах величина магнітного поля пропорційна круговій частоті електромагнітного поля. Тому прилади працюють з великими магнітними полями. Якщо виразити робочу частоту в гігагерцах, величину магнітного поля в теслах, то

$$f(\text{ГГц}) = 28B [\text{Тл}].$$

Як видно, для генерації хвилі довжиною 1 мм потрібне магнітне поле з індукцією 10Тл. Таке магнітне поле можна отримати тільки в соленоїді з котушками з надпровідного матеріала при гелієвих температурах. Це і є один із суттєвих недоліків гіроприладів. Другим істотним недоліком гіроприладів є їхня вузькосмуговість, яка закладена в принципі роботи цих приладів. Робоча полоса частот гіроприладу визначається шириною лінії циклотронного резонанса і досягає долей відсотків від середньої робочої частоти.

Розглянутий вище гіроприлад має назву гіротрон і є аналогом приладу О-типу – монотрона.

Якщо помістити на шляху руху електронів другий резонатор, можна отримати гіроклістрон – аналог дворезонаторного прольотного клістрона. Перший в СРСР гіроклістрон був створений на кафедрі РТПС в співдружності з НДІ «Оріон» в 1969 році (Тараненко В. П., Ліждвой К. Я., Глушенко В. М., Рапопорт Г. Н., Прус В. А., Кошева С. В., Трапезон В. А.). Клістрон працював в міліметровому діапазоні хвиль, мав коефіцієнт підсилення 40дБ, ККД до 40%, при потужності в тривалому режимі порядку одиниць кіловатів. Вперше на кафедрі РТПС був розроблений метод експериментального аналізу мікроструктури електронних потоків в гіротронах та збудований аналізатор таких потоків [4, 5]. По аналогії можна побудувати гіро-лампи біжучої хвилі [гіро-ЛБХ], гіро-лампи зворотної хвилі [гіро-ЛЗХ].

Процес підсилення в гіро-ЛБХ аналогічний підсиленню в звичайній ЛБХ типу О. Електродинамічна система гіро-ЛБХ являє собою гладкий циліндричний хвилевід з входним пристроєм для перетворення електромагнітної хвилі на вході приладу в хвилю типу H_{01} . В електродинамічній системі відбувається взаємодія електронів з полем хвилі, що розповсюджується в напрямку руху електронів. На колекторному кінці є вивід енергії, аналогічний виводу енергії гіротрона (рис. 2), та пристрій узгодження хвилеводу з вихідним трактом. Вихід електронів з синхронізму з полем відбувається за рахунок різкого зменшення напруженості магнітного поля в області колектора.

Підсилення сигналу в гіро-ЛБХ в умовах точного синхронізму відбувається таким чином. Електрони, рухаючись в полі хвилі підсилюваного ВЧ сигналу, отримують модуляцію енергії обергання, в результаті чого відбувається їх азимутальне групування. По мірі утворення згустків в електронному потоці створюється гармоніка конвекційного струму, що збуджує хвилю ВЧ-

поля, яка інтерферує з хвилею підсилюваного сигналу. Фаза збуджуваної хвилі відповідає умовам максимального гальмування електронних згустків, що передають свою енергію полю хвилі. Найбільша ширина полоси підсилення відповідає умові рівності групової швидкості хвилі швидкості поступального руху електронів.

Підсумовуючи, цікаво привести як приклад, дані сучасних гіроприладів [6].

Таблиця 1

Назва	Тип приладу	Робочий діапазон ГГц	Потужність кВт	ККД %	Коеф. підсилення дБ	Полоса %	Літра
917Н	Генераторний гіротрон імпульсного режиму	60	285	44			[6]
934НХХ	те ж саме	100	500	35			“-
VGB8005	Генераторний гіротрон тривалого режиму	56	200	35			“-
931ХХ	те ж саме	90-100	1	30			“-
лаб. зразок	Гіроклістрон тривалого режиму	35	400	40	40	0,1	“-
916Н	Гіро-ЛБХ тривалого режиму	91-95	5	8	30	2	“-

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Тетельбаум С. І. Про поняття фазової швидкості послідовності частинок // ДАН УРСР. – 1954. – № 1.
2. Тетельбаум С. І. Фазохронні генератори обратної волни // Радиотехніка і електроніка. – 1957. – № 1.
3. Гапонов А. В. Возбудження лінії передачі непрямолинейним електронним потоком. Взаємодія непрямолинейних електронних потоків з електромагнітними хвилями в лініях передачі // Радиофізика. – 1959. – № 3.
4. Тараненко В. П., Прус В. А., Лиждвой К. Я. Новий метод дослідження спіралізованих електронних пучків для фазохронів // Електронна техніка. Електроніка СВЧ. – 1970. – № 10.
5. Тараненко В. П., Глушенко В. Н., Кошова С. В., Трапезов В. А. Влияние разброса скоростей электронов в поливинтовых электронных потоках на стартовый ток и КПД гиروتронов // Электронная техника. Электроника СВЧ. – 1974. – № 2.
6. Лучшие зарубежные СВЧ-приборы. Справочные материалы по электронной технике // Ю. Н. Чукина, М. Е. Багарина и др. – 1986.

Надійшла до редколегії 05.03.98.