

В. П. ТАРАНЕНКО

## ПРО ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ЛАМПИ БІЖУЧОЇ ХВИЛІ

Підвищення коефіцієнта корисної дії лампи біжучої хвилі (ЛБХ) є одним з основних завдань сучасної радіоелектроніки. Від швидкості розв'язання її залежить успіх впровадження цього перспективного електронного приладу в техніку зв'язку, різні галузі народного господарства та промисловість.

Розвиток електронної обчислювальної техніки в останні роки дозволив на основі розв'язання систем нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь лампи біжучої хвилі провести розрахунки залежності к. к. д. від її основних параметрів: підсилення  $S$ , об'ємного заряду  $QC$ , величини струму електронного потоку  $I$ , коефіцієнта несинхронності  $b$ , поперечного розміру пучка  $ha$  та затухання  $d$ . Якісний аналіз одержаних результатів обчислень дозволив краще зрозуміти основні робочі процеси у підсилювачі біжучої хвилі, зокрема групування електронних згустків, механізму «насичення» та ін. Все це дає змогу більш грамотно підходити до розрахунків при проектуванні приладів з біжучою хвилею та розробляти способи дальшого підвищення їх ефективності.

Існують два основні способи підвищення к. к. д. підсилювачів біжучої хвилі: 1) ізохронність, основана на підтримці синхронізму електронів і хвилі вздовж уповільнюючої системи; 2) рекуперація енергії «відпрацьованих» електронів в області колектора за рахунок зниження потенціалу колектора відносно уповільнюючої системи (при цьому збільшується загальний, або «технічний», к. к. д. без зростання вихідної потужності).

Слід звернути увагу ще на ряд факторів, що відіграють важливу роль в одержанні максимального к. к. д. лампи біжучої хвилі.

Коефіцієнт корисної дії лампи біжучої хвилі визначається співвідношенням

$$\eta_e = \frac{P_e}{I_0 U_0},$$

де  $P_e$  — потужність, віддана електронним потокам полю;  
 $I_0 U_0$  — потужність електронного потоку.

При наявності в системі затухання  $P_e$  являє собою суму високочастотної потужності та потужності втрат. У загальному виді  $P_e$  можна записати формулою

$$P_e = -\frac{1}{2} \int_0^L |J_1(z)| |E(z)| \cos \psi,$$

де  $L$  — довжина простору взаємодії;

$J_1(z)$  — комплексна амплітуда першої гармоніки струму пучка;

$E(z)$  — комплексна амплітуда поздовжньої складової електричного поля уповільнюючої системи на частоті  $\omega$ ;

$\psi$  — різниця фаз між першою гармонікою струму та поздовжнім електричним полем.

Для підвищення к. к. д. необхідно прагнути до збільшення  $P_e$ , а отже, і амплітуди першої гармоніки струму пучка та поздовжнього електричного поля. Проте, як показали численні теоретичні та експериментальні роботи [1], [2], збільшення цих величин приводить до підвищення ефективності приладу лише в певних межах. Так, збільшення параметра підсилення  $S$ , що містить в собі ці дві величини, вище 0,2 вагомому вирашу в к. к. д. уже не дає.

Залежність к. к. д. від величини струму  $I$ , як відомо, має вигляд, показаний на рис. 1 [2]. На ньому ж нанесена величина  $P_e$ .

Як видно, зі збільшенням величини струму круто зростає лише потужність  $P_e$ . Отже, при проектуванні та розрахунку приладів не слід забувати про те, що існує певна оптимальна величина струму пучка, що обумовлює найвищий к. к. д.

Максимальному к. к. д. відповідає певна оптимальна товщина, або діаметр пучка [1], [3]. У тонкому пучку сконцентровані сили об'ємного заряду електронів викликають раптове гальмування електронів, що обумовлює появу повільних електронів на порівняно ранній стадії. Крім того, висока концентрація сил об'ємного заряду протидіє створенню щільних електронних згустків. При великих діаметрах пучка, а отже, і пролітних каналів, важно забезпечити однорідність поля по перерізу пучка.

Як показують розрахунки, з врахуванням зазначених зауважень без додаткових заходів можна одержати максимальні к. к. д. лампи біжучої хвилі 42—45%. У реальних приладах к. к. д., як правило, значно менші.

Однією з важливих причин зниження к. к. д. порівняно з теоретичною величиною є те, що електронний пучок не циліндричний, як вважається в розрахунках, а пульсуючий.

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень було встановлено, що наявність пульсації зовнішньої границі пучка до 0,25 не викликає істотних змін енергетичних параметрів лампи біжучої хвилі — потужності насичення та к. к. д. [4].

При пульсації  $\alpha > 0,25$  спостерігається помітне зниження максимальної амплітуди поля, а отже, і к. к. д. На рис. 2 і 3 показана залежність нормованої амплітуди поля  $|E_n|$  від довжини лампи для режимів з  $\alpha = 0; 0,25; 0,5$  та  $0,75$  для пучка з великим ( $ha = 1,5$ ) та малим ( $ha = 0,5$ ) приведеним радіусом.

Як видно з рисунків, вплив пульсацій при тонкому пучку виявляється сильніше, а саме: амплітуда поля  $|E_n|$  в точці насичення

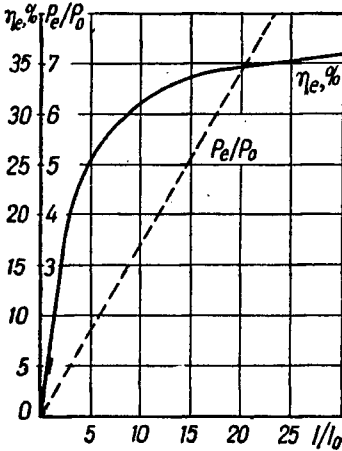


Рис. 1. Залежність  $P_e$  та  $\eta_e$  від величини струму пучка.

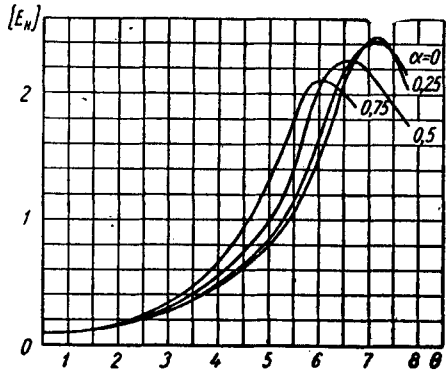


Рис. 2. Залежність безрозмірної амплітуди нормованого височастотного поля на осі уповільнюючої системи  $|E_n|$  вздовж лампи при  $\alpha=0; 0,25; 0,5$  та  $0,75$ ;  $ha=1,5$ ;  $QC=0,25$ ;  $C=0,05$ ,  $b=2,5$ ;  $E_{n0}=0,1$ ,  $d=0$ .

зменшується в більшій мірі, ніж при  $ha = 1,5$  при однакових значеннях коефіцієнта пульсацій  $\alpha$ .

Зменшення потужності насичення лампи біжучої хвилі з пульсуючим пучком обумовлене зниженням максимуму амплітуди першої гармоніки  $|J_1|$  при збільшенні коефіцієнта пульсацій (рис. 4).

Фазові співвідношення між напруженістю електричного поля та першою гармонікою струму в лампі при різних величинах пульсацій майже не відрізняються [4].

На рис. 5 наведені криві залежності відношення максимального к. к. д. лампи з пульсуючим пучком до максимального к. к. д. лампи з циліндричним пучком радіуса  $ha$  від коефіцієнта пульсацій  $\alpha$ .

Як і слід було сподіватися після розгляду кривих рис. 2—4, істотне зменшення к. к. д. помічається при пульсаціях, більших  $0,25$ , причому в тонких пучках це зниження помітніше. Таким чином, наявність пульсацій пучка можна вважати однією з основ-

них причин зменшення величини к. к. д. у реальних приладах порівняно з прогнозами на основі теоретичних досліджень та розрахунків.

Поліпшення форми пучка є одним з важливих резервів підвищення к. к. д. у реальних приладах.

З двох спеціальних заходів підвищення к. к. д. найефективнішим і найперспективнішим є використання рекуперації загальмованих електронів в області колектора.

Використання ізохронності, ідея якої виникла давно, поки що не дало відчутних результатів через значні труднощі при прак-

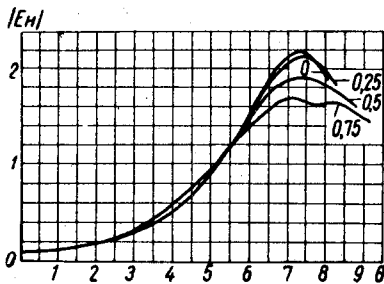


Рис. 3. Залежність безрозмірної амплітуди нормованого високочастотного поля на осі уповільнюючої системи  $|E_H|$  вздовж лампи при  $\alpha=0; 0,25; 0,5$  та  $0,75$ ;  $ha=0,5$ ;  $QC=0,25$ ;  $C=0,05$ ;  $b=2$ ;  $d=0$ ;  $E_{no}=0,1$ .

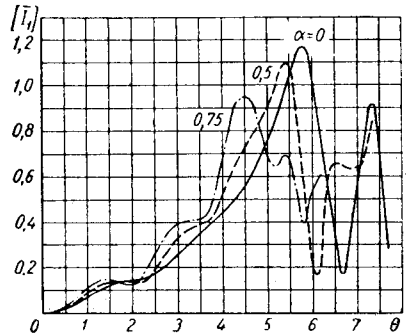


Рис. 4. Залежність безрозмірної амплітуди першої гармоніки струму пучка вздовж лампи при  $\alpha=0; 0,5$  та  $0,75$ ;  $ha=1,5$ ;  $QC=0,25$ ;  $C=0,05$ ;  $b=2,5$ ;  $d=0$ ;  $E_{no}=0,1$ .

тичному впровадженні її в життя, особливо в короткохвильовій частині сантиметрового діапазону хвиль.

Одноступінчаста рекуперація давно дістала визнання і зараз широко використовується як засіб підвищення к. к. д. у генераторах та підсилювачах біжучої хвилі [5], [6].

Наявність значного розкиду енергії електронів у ЛБХ не дозволяє знижувати потенціал одноступінчастого колектора нижче потенціалу уповільнюючої системи і тим самим обмежує можливе підвищення к. к. д.

Досягнуті на сьогоднішній день к. к. д. ламп біжучої хвилі лежать у межах 20—40% [5] [6]. Дальше підвищення к. к. д. можливе при використанні багаступінчастої рекуперації, коли в колекторі, що складається з цілого ряду електродів (на які подані різні потенціали по відношенню до катода), електрони сортуються по швидкостях так, що тільки найповільніші попадають на електрод з найвищим потенціалом, а інші розподіляються по електро-

дах з більш низькими потенціалами відповідно. Доцільність застосування багатоступінчастої і, зокрема, двоступінчастої рекуперації залежить від енергетичного спектра електронного потоку, що надходить на колектор.

У роботах [2], [7] на основі розв'язання нелінійних рівнянь ЛБХ був проведений аналіз енергетичного спектра електронів на вході в колектор. Він дав можливість підрахувати можливий ефект застосування багатоступінчастої рекуперації в електронних приладах.

На рис. 6 показані максимальні значення к. к. д. ламп біжучої хвилі для різних значень параметрів  $QC$ ,  $ha$ ,  $d$  та  $\alpha$ . Параметр несинхронності відповідає максимуму к. к. д. Як видно з рисунка, одноступінчата рекуперація при  $QC = 0,25$ ,  $ha = 1$ ,  $d = 0$  та  $\alpha = 0$  (крива 1) збільшує к. к. д. від 27 до 57%, тобто в 2,1 раза; двоступінчата — до 73%, а п'ятиступінчата —

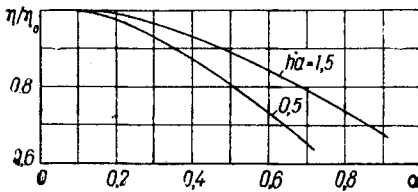


Рис. 5. Залежність  $\eta/\eta_0$  від коефіцієнта пульсацій  $\alpha$ :

$\eta$  — к. к. д. лампи з пульсуючим пучком;  
 $\eta_0$  — к. к. д. лампи з циліндричним пучком з середнім радіусом  $ha$ .

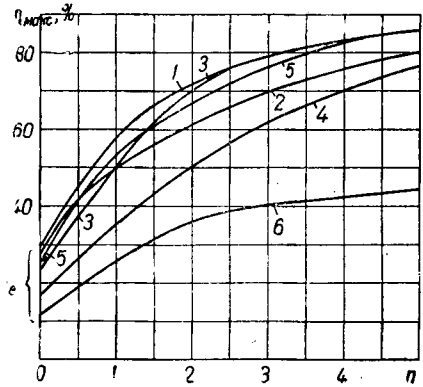


Рис. 6. Залежність  $\eta_{\max}$  від числа ступенів рекуперації в лампі біжучої хвилі ( $C=0,05$ , насичення):

1 —  $QC=0,25$ ;  $d=0$ ;  $\alpha=0$ ;  $ha=1$ ; 2 —  $QC=0,75$ ;  $d=0$ ;  $\alpha=0$ ;  $ha=1,5$ ; 3 —  $QC=0,25$ ;  $d=0$ ;  $\alpha=0,5$ ;  $ha=1$ ; 4 —  $QC=0,25$ ;  $d=0$ ;  $\alpha=0,75$ ;  $ha=1$ ; 5 —  $QC=0,25$ ;  $d=0$ ;  $\alpha=0,5$ ;  $ha=0,5$ ; 6 —  $QC=0,25$ ;  $d=0,2$ ;  $\alpha=0$ ;  $ha=0,5$ .

до 87%. Збільшення параметра об'ємного заряду в 3 рази (крива 2) зменшує максимальні к. к. д. при рекуперації приблизно на 10%.

Вплив пульсації зовнішньої границі пучка на к. к. д. видно із порівняння кривих 3 та 4 (рис. 6). Помітне зниження  $\eta_{\max}$  починає проявлятися при  $\alpha = 0,5$  (крива 3), коли збільшення розштовхуючих сил у вузлах утруднює гальмування передньої частини електронних згустків, що приводить до появи великої кількості прискорених електронів [7]. Ще більше розширення енергетичного спектра спостерігається при  $\alpha > 0,75$  (крива 4). При цьому граничні значення к. к. д. при одноступінчастій та двоступінчастій рекуперації падають на 23% порівняно з режимом без пульсацій (крива 1).

Вплив ширини пучка на  $\eta_{\max}$  видно з порівняння кривих 1 і 5. При невеликих  $QC$  зменшення приведенного радіуса  $ha$  в 2 рази зменшує  $\eta_{\max}$  при двоступінчастій рекуперації на 6%, при чотириступінчастій — лише на 1%.

Для підвищення к. к. д. лампи біжучої хвилі багатоступінчастою рекуперацією можна рекомендувати двоступінчасту або триступінчасту рекуперацію енергії відпрацьованих електронів з гальмуванням електронів на останньому ступені до потенціалу катода. При правильно вибраній конструкції двоступінчастого колектора можна одержати  $\eta_{\max} = 50 \div 60\%$ , для триступінчастого — до 65%. Таким чином, підвищення  $\eta_{\max}$  за рахунок рекуперації може бути істотним.

Проте не можна забувати й про деякі негативні риси систем з багатоступінчастою рекуперацією, а саме: а) складність конструкції колектора, пов'язану з необхідністю подавлення вторинної емісії; б) необхідність окремих джерел живлення для різних ступенів колектора. Все це ускладнює як електронний прилад, так і всю установку, де він працює. Тому основну увагу слід приділяти підвищенню електронного к. к. д. лампи. Для цього при розрахунку та проектуванні ламп важливе значення має оптимальний вибір величини струму пучка та розміру пролітного каналу приладу (а значить, і приведеного радіуса пучка).

Слід старанно відпрацювати електронно-оптичну систему приладу з метою зменшення пульсацій пучка до 0,25. Критерієм старанно відпрацьованої оптики для систем з магнітною фокусуванням електронного потоку є забезпечення можливості нормальної роботи приладу з малим струмом на уповільнюючу систему при величині магнітного поля до  $1,3 H_{бр}$  ( $H_{бр}$  — величина напруженості магнітного поля по Бріллюєну).

Багатоступінчасту систему рекуперації слід рекомендувати при неможливості одержати високі значення  $\eta_e$ , наприклад у ширококугових лампах, які працюють з уповільнюючими системами з малим значенням опору зв'язку.

Сучасний розвиток електровакуумної технології, зокрема технології височастотної кераміки, дозволяє створювати надійні багатоступінчасті колекторні системи.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Cutler C. C. The nature of power saturation in traveling wave tubes, Bell system Technical Journal, 1956, 35, N 4.
2. Цейтлин М. Б., Кац А. М. Лампа бегущей волны. «Советское радио», 1964.
3. Тараненко В. П., Шевченко В. И. Выбор оптимальной величины пролетного канала в лампе бегущей волны. — «Радиотехника и электроника», 1966, XI, 11.
4. Тараненко В. П., Шевченко В. И. Влияние пульсацій пучка в пролетном канале ЛБВ на мощность и к. п. д. — «Радиотехника и электроника», 1965, X, 7, 1269.

5. Bryant M. O., Thomas A., Wells P. A high power C. W. travelling wave tube, J. Electronic and Control, Jan., 1962, 12, № 1, 49.

6. F. Sterzer, Improvement of travelling wave tube efficiency through collector potential depression, Trans. IRE, 1958, ED-5, № 9, 30.

7. Муравьев В. В., Тараненко В. П. Повышение к. п. д. генераторов обратной волны, ЛБВ 0-типа при многоступенчатой рекуперации.— Известия вузов СССР — Радиотехника, 1964, VII, 6, 649.

*В. П. ТАРАНЕНКО*

## О ПОВЫШЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

### Краткое содержание

В статье приведены соображения о правильном выборе при проектировании приборов основных параметров лампы бегущей волны для получения максимального к. п. д.

Наличие пульсаций внешней границы пучка приводит к снижению к. п. д. лампы бегущей волны по сравнению с теоретическими расчетами.

Детальная отработка электронно-оптической системы с целью получения малых пульсаций является одним из действенных резервов повышения электронного к. п. д. лампы. Из специальных мер по повышению к. п. д. в лампах бегущей волны, особенно в приборах с малым электронным к. п. д., отмечается многоступенчатая рекуперация энергии электронов в области коллектора.

*V. P. TARANENKO*

## TO THE QUESTION OF TWT'S EFFICIENCY IMPROVEMENT

### Summary

In this paper the design considerations of a correct choice of TWT main parameters for achieving the highest efficiency are presented.

The beam ripples decrease TWT's efficiency in contrast of theory's prediction.

Detailed electron-optical system design for achieving small ripples is one of the real possibilities of TWT electronic efficiency improvement.

Many-staged collector potential depression is a special measure in TWT efficiency improvement (especially for the devices with small electronic efficiency).