

Ю. П. ПАВЛЮЧЕНКО, М. Я. ВАСИЛЬЧУК

МЕТОД ОБЕРТОВОГО ЗОНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АКСІАЛЬНО-СИМЕТРИЧНИХ ПУЧКІВ ЕЛЕКТРОНІВ

У роботах [1] і [2] запропоновано метод вібруючого зонда для дослідження аксіально-симетричних пучків електронів, який був використаний для експериментального дослідження пучків, що фокусуються електростатичними полями [3], [4]. Мета даної статті—обґрунтування можливості застосування для аналізу протяжних електронних пучків підвищеної потужності, що фокусуються магнітним полем, модифікації методу вібруючого зонда — методу обертового зонда [5].

Суть цього методу полягає в тому, що один або кілька зондів, які є на обертовій головці, перетинають досліджуваний пучок електронів перпендикулярно до його осі, відбираючи при цьому невелику частину струму пучка. Якщо аналізувати залежність зондового струму від місця зонда в пучку, можна визначити основні параметри електронного пучка. Метод обертового зонда має ряд переваг у порівнянні з методом вібруючого зонда. Застосування обертання дозволяє одержати постійну швидкість проходження зонда через пучок, що підвищує точність вимірювань. Конструктивно метод обертового зонда більш прийнятний для дослідження протяжних електронних пучків, що фокусуються магнітним полем, бо дозволяє плавно переміщати обертову головку із зондом по довжині пучка.

Метод обертового зонда передбачає використання масивної головки, на якій жорстко закріплені зонди, що збільшує тепловідвід від зонда і тим самим підвищує рівень потужностей досліджуваних пучків. При необхідності можна застосувати водяне охолодження головки.

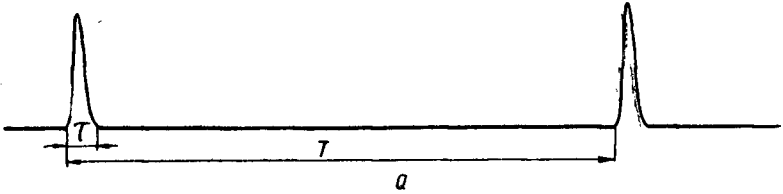
Розглянемо визначення профілю аксіально-симетричного пучка, що фокусується магнітним полем. Профіль електронного пучка можна одержати, вимірюючи діаметр пучка в різних перерізах по його довжині. Для визначення діаметра циліндричного пучка в обраному перерізі необхідно зняти залежність струму, що відбирає зонд при проходженні пучка, від місця зонда відносно пучка

(рис. 1,б). Реєструючи зондовий струм на екрані осцилографа, одержимо осцилограму зондового струму, типовий вигляд якої наведений рис. 1,а.

З рис. 1,б видно, що діаметр пучка визначається співвідношенням

$$D_{\text{п}} = 2R \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$

Якщо довжина імпульсу струму дорівнює τ , а період повторення імпульсів T , то



$$\alpha = \frac{2\pi\tau}{T},$$

а

$$D_{\text{п}} = 2R \sin \frac{\pi\tau}{T}. \quad (2)$$

Формула (2) дає можливість визначити діаметр пучка по його зондовій характеристиці. Якщо розміри пучка такі, що $\pi \frac{\tau}{T} \leq 0,35$, діаметр пучка з похибкою не більше 2% може бути визначений формулою

$$D_{\text{п}} \approx 2\pi R \frac{\tau}{T}. \quad (3)$$

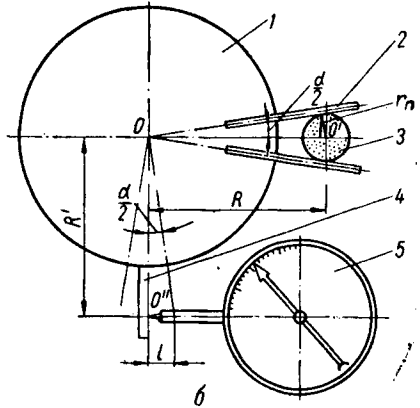


Рис. 1. Типова осцилограма зондового струму (а) та схема вимірювання діаметра пучка (б).

Якщо розмір зонда δ співмірний з діаметром пучка, то діаметр останнього

$$D_{\text{п}} = 2R \sin \frac{\tau\pi}{T} - \delta. \quad (4)$$

З виразу (4) видно, що в методі, який розглядаємо, на відміну від методу вібруючого зонда, відпадає необхідність вимірювати амплітуду коливань зонда, що підвищує точність визначення поперечних розмірів пучка.

Зробимо оцінку похибки у визначенні діаметра пучка методом обертового зонда. Із формули (4) випливає, що відносна помилка у визначенні діаметра пучка

$$\frac{\Delta D_n}{D_n} = \frac{\arcsin D_n/2R}{D_n/2R} \sqrt{1 - \left(\frac{D_n}{4R}\right)^2} \times \sqrt{\left(\frac{d\tau}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{dT}{T}\right)^2 + \left(\frac{d\delta}{\delta}\right)^2}. \quad (5)$$

Для визначення діаметра пучків невеликих густин струму можна застосувати одну з модифікацій методу обертового зонда — метод торкання краю пучка. На рис. 1,б подана схема вимірювання діаметра пучка цим методом. Торкаючись зондом протилежних країв пучка і відліковуючи кут $\alpha/2$, який при цьому проходить зонд, можна за формулою (1) визначити діаметр пучка. Нами був застосований такий метод відліку кута $\alpha/2$. На шток, що здійснює рух зонда, поза вакуумною оболонкою жорстко закріплений важіль R' , встановлений перпендикулярно до OO'' . Індикатор годинникового типу вимірює переміщення важеля l при проходженні зонда через пучок. З рис. 1,б випливає, що

$$D_n = 2R \frac{l/R'}{\sqrt{1 + (l/R')^2}}. \quad (6)$$

Обираючи $R' = R$, а також враховуючи, що звичайно $\frac{l}{R'} \ll 1$, з незначною похибкою можна вважати, що

$$D_n = 2l. \quad (7)$$

Таким чином, якщо проградувати шкалу індикатора годинникового типу у величинах діаметра пучка, можна безпосередньо визначити розмір пучка у будь-якому його перерізі. Обираючи індикатор з необхідною ціною поділу, цим методом можна визначити розміри пучків дуже малого діаметра. Точність відліку при цьому визначається в основному точністю показань індикатора, а потужності досліджуваних пучків — теплостійкістю зонда. Практично зручніше застосувати замість одного два зонди, що охоплюють пучок «вилкою». Торкаючись по черзі кожним зондом ближчого краю пучка і відраховуючи при цьому показання індикатора, можна визначити діаметр пучка, якщо попередньо виміряти кут між зондами.

Розглянемо можливості методу обертового зонда для дослідження пучків з підвищеними потужностями, зокрема для випадку суцільного циліндричного пучка. При цьому вважаємо, що діаметр циліндричного зонда значно менший за діаметр пучка, а імпульси струму, що падають на зонд, прямокутні.

Якщо циліндричний зонд нескінченної довжини повільно посувається або стоїть нерухомо в пучку, то максимальна величина струму, що відбирає зонд, як видно з рис. 1,б, визначається співвідношенням

$$i_s = \frac{I_p S_z}{S_p}, \quad (8)$$

де I_p — повний струм пучка;

$S_z = \delta D_p$ — поверхня проекції зонда на переріз пучка;

$S_p = \frac{\pi D_p^2}{4}$ — площа перерізу пучка.

Величина максимальної потужності, що падає на нерухомий зонд,

$$P_s = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{P_p \delta}{D_p}. \quad (9)$$

З рівняння (9) дістаємо величину потужності пучка, яку можна дослідити статичним зондом,

$$P_{п.ст} = \frac{\pi D_p P_s}{4\delta}. \quad (10)$$

З останнього виразу випливає, що рівень потужності вимірюваних пучків визначається тепловою здатністю зонда, яка характеризується величиною P_s / σ . Межі вимірюваних потужностей пучків можуть бути значно розширені, якщо скоротити час проходження зонда в пучку, використавши його обертання.

Врахуємо імпульсне нагрівання зонда при його проходженні через пучок. При розрахунку користуватимемося такими припущеннями: імпульси струму на зонд прямокутні; теплофізичні параметри зонда не залежать від температури; глибина імпульсного прогрівання зонда значно менша його геометричних розмірів. Зробимо розрахунок для поодинокого імпульсу, тепловтрату протягом якого не враховуємо.

Відповідно до рівняння (5) величина приросту температури на поверхні зонда за час дії імпульсу τ

$$T_m = \frac{0,48 U_p j \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi \lambda c_p \gamma}} = \frac{0,27 U_p j \sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda c_p \gamma}}, \quad (11)$$

де U_p — потенціал пучка, кВ;

j — густина струму, ма/см²;

c_p — теплоємність матеріалу зонда;

γ — питома вага;

λ — коефіцієнт теплопровідності.

Із рівняння (3) випливає, що довжина імпульсів струму, що падають на зонд, дорівнює

$$\tau = \frac{D_{\text{п}}}{2\pi RF}. \quad (12)$$

Густину струму по перерізу пучка беремо як постійну і рівну

$$j = \frac{4I_{\text{п}}}{\pi D_{\text{п}}^2}. \quad (13)$$

Враховуючи (12) та (13), одержимо

$$T_m = \frac{0,137}{\sqrt{\lambda c_p \gamma}} \cdot \frac{P_{\text{п}}}{D_{\text{п}}^{3/2} (RF)^{1/2}}. \quad (14)$$

При використанні танталу як матеріалу зонда $(\lambda c_p \gamma)^{-\frac{1}{2}} = 3$, і формула (14) набере вигляду

$$T_m = 0,412 \frac{P_{\text{п}}}{D_{\text{п}}^{3/2} (RF)^{1/2}}. \quad (15)$$

В установці, на якій експериментально розроблявся даний метод, взято $R = 12,5$ мм. Величина імпульсної температури в цьому випадку визначається формулою

$$T_m = 0,37 \frac{P_{\text{п}}}{D_{\text{п}}^{3/2} F^{1/2}}, \quad (16)$$

де $P_{\text{п}}$ — потужність пучка, *вт*;

$D_{\text{п}}$ — діаметр пучка, *см*;

F — частота обертання зонда, *1/сек*.

З формули (15) видно, що для зниження імпульсної температури зонда при дослідженні пучка заданого діаметра і потужності необхідно збільшувати швидкість обертання зонда та величину R .

На рис. 2,а показана залежність імпульсної температури зонда від потужності досліджуваного пучка при різних його діаметрах і постійній частоті обертання зонда ($F = 4$ об/сек).

Згідно з формулою (15) величина припустимих потужностей пучків дорівнює

$$P_{\text{п}} = 2,53 T_m D_{\text{п}}^{3/2} (RF)^{1/2}, \quad (17)$$

а густина потужності

$$\frac{P_{\text{п}}}{S_{\text{п}}} = 3,1 T_m \sqrt{\frac{RF}{D_{\text{п}}}}. \quad (18)$$

На установці експериментального дослідження пучків, яка використовує метод обертового зонда, нами були досліджені пучки

потужністю 200 *вт*, діаметром 1,5 *мм*. Частота обертання танталового зонда при цьому становила 2 *об/сек*, а величина *R* дорівнювала 12,5 *мм*. З формули (16) випливає, що імпульсна температура зонда становить 1300° *С*. Беручи величину припустимої температури зонда 1300° *С*, з рівняння (17) одержимо значення потужностей пучків, які можуть бути досліджені методом обертового зонда. Ці значення показані на рис. 3.

На рис. 2,б показана залежність припустимих густин потужностей досліджуваних пучків діаметра пучка при частоті обертання зонда 4 *об/сек* і величині *R* = 12,5 *мм*. Значення максимально припустимих густин потужностей лежать у межах від 10 до 30 *квт/см²* при зміні діаметра пучка від 1 до 5 *мм*.

Рівень потужностей пучків, що досліджуються методом обертового зонда, може бути значно підвищений, якщо використати імпульсну модуляцію струму досліджуваної електронної гармати.

Експериментальна розробка методу обертового зонда виконувалась на установці (рис. 4), яка включала в себе систему формування 1 і фокусування електронного пучка,

а також електричну схему для вимірювання його параметрів.

Аналізатор пучка являє собою молибденову головку 5 із закріпленими на ній зондами 4, яка може обертатися і плавно переміщуватися вздовж осі пучка на ділянці 120 *мм*. Зонд виготовлений з вольфрамового дроту діаметром, значно меншим за діаметр пучка. Для деяких досліджень за зонд брали танталову пластинку товщиною 0,1—0,2 *мм* і протяжністю 0,4—0,6 *мм* вздовж осі пучка. Вакуумне ущільнення штока 7, що здійснює обертово-поступальний рух, забезпечується рядом тефлонових кілець 11, стиснутих циліндром 12. При частоті обертання штока 2—3 *об/сек* і одночасному його переміщенні в приладі підтримується вакуум порядку $(3 \div 5) \cdot 10^{-6}$ *тор*.

Фокусуєчий соленоїд секціонований для нарізного регулювання струму через кожну секцію з метою забезпечення необхідного

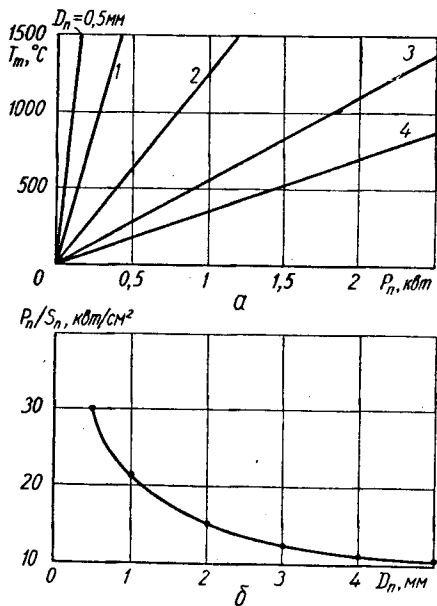


Рис. 2. Залежності температури зонда від потужності пучка (а) та припустимої густини потужності від діаметра пучка (б).

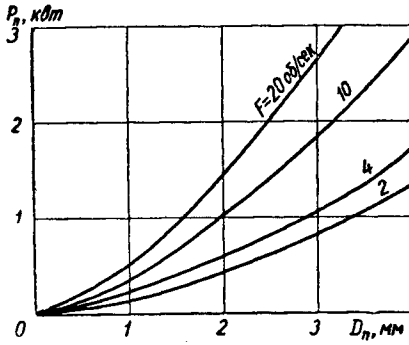


Рис. 3. Залежність припустимої потужності пучка від його діаметра.

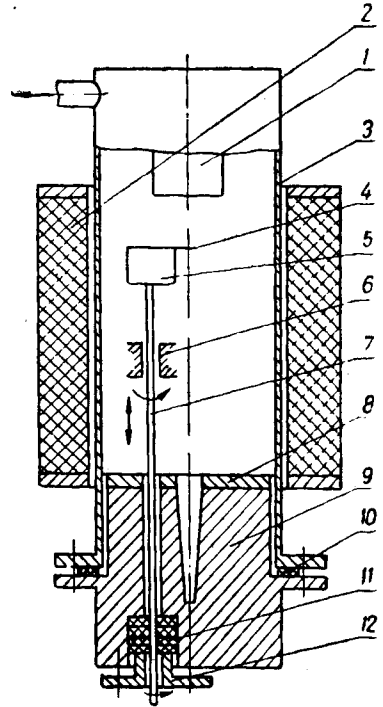


Рис. 4. Принципова схема установки для дослідження електронних пучків:

1 — фокусуючий соленоїд; 2 — електронна гармата; 3 — оболонка; 4 — зонд; 5 — головка зонда; 6 — підшипник; 7 — шток; 8 — магнітний екран; 9 — колектор; 10 — вакуумне ущільнення; 11 — циліндр.

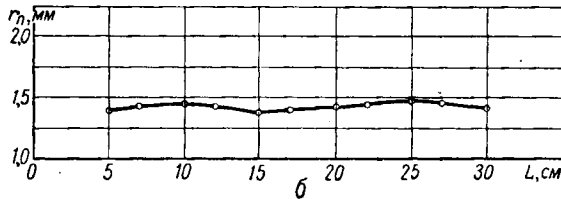
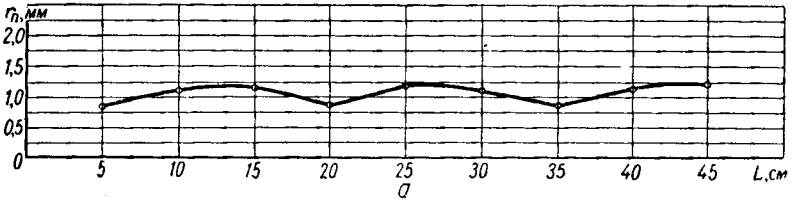


Рис. 5. Експериментально виміряні профілі пучків:
 а — первеанс пучка $0,5 \cdot 10^{-8} \text{ а/в}^3/2$; б — первеанс пучка $2 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}^3/2$.

поздовжнього розподілу магнітного поля. Зондові характеристики досліджуваних пучків візуально спостерігались на електронному осцилографі ЭНО-1, а також рееструвались на шлейфовому осцилографі Н-700. Типову осцилограму зондового струму, одержану на осцилографі Н-700, подано на рис. 1,а.

Для перевірки розгляданого методу дослідження на даній установці були проведені вимірювання профілю деяких аксіально-симетричних пучків з брілуєнівською системою фокусування. На рис. 5,а подано профіль пучка, який формується гарматою з первансом $0,5 \cdot 10^{-6} a/b^{1/2}$ при колекторному струмі 6 ма. Рис. 5,б показує профіль пучка, що створює гармата з первансом $2 \cdot 10^{-6} a/b^{-12-3/2}$ і струмом 10 ма, при фокусуєчому полі 670 гс. Було проведено порівняння величин діаметрів пучків, виміряних методом обертового зонда і методом торкання краю пучка, і знайдено задовільну відповідність результатів.

Ми вважаємо за можливе в розвиток методу обертового зонда розробку панорамного аналізатора (рис. 6), що дасть змогу контролювати поведінку електронного пучка на значній довжині його в заанодному просторі. При цьому на екрані осцилографа можна спостерігати та кількісно вимірювати основні параметри пучка одночасно на всій довжині дослідження.

Зондова головка 2 має таку конструкцію, що зонди, зміщені один від одного в осьовому напрямі, по черзі перетинають пучок перпендикулярно до його осі. Напруження, що створюється на опорі R при проходженні імпульсів зондових струмів, після апаратного перетворення надходить на вхід осцилографа. Кутува віддаль між зондами обирають так, щоб в пучку водночас не було двох сусідніх зондів. Як показують розрахунки, можна таким чином обрати параметри аналізатора, щоб кількість зондів на обраній ділянці довжини дослідження пучка задовольняла достатню точність у визначенні розподілу параметрів пучка по його довжині. Цей метод аналізу електронних пучків може бути використаний у випадку фокусування пучків як з однорідними, так і з періодичними магнітними полями, якщо конструкція періодичної системи дозволяє розмістити аналізуючий пристрій.

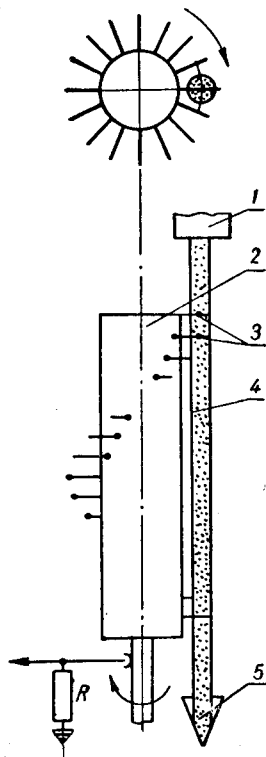


Рис. 6. Схема панорамного аналізатора:
1 — електронна гармата; 2 — зондова головка; 3 — пучок; 4 — колектор.

ЛІТЕРАТУРА

1. О в ч и н н и к о в І. К., З і н ч е н к о М. С. Метод вібруючого зонда для дослідження аксіально-симетричних пучків електронів.— УФЖ, т. IV, 119, 1959.
2. З и н ч е н к о Н. С. Курс лекцій по електронній оптиці. Изд-во Харківського університета, 1961.
3. К и р с а н о в В. М. и др. Измерение распределения плотности тока во внешнем пучке циклотрона.— ПЭТ, т. I, 111, 1960.
4. Л а п и ц к и й Ю. Я., С л и в к о в И. Н. Прибор для контроля пучка на выходе ускорителя.— ПТЭ, т. 5, 121, 1960.
5. Т и к т и н С. А. Некоторые вопросы теплотехники электровакуумных приборов. Харьков, 1960.

Ю. Ф. ПАВЛЮЧЕНКО, Н. Я. ВАСИЛЬЧУК

МЕТОД ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЗОНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В работе проведено обоснование метода вращающегося зонда для исследования протяженных электронных пучков повышенных мощностей, фокусируемых магнитным полем.

Описана методика и выведены соотношения для определения профиля аксиально-симметричного пучка. Определена мощность пучков, которые могут быть исследованы описанным методом.

Дано описание установки для исследования пучков методом вращающегося зонда, а также приведены некоторые экспериментальные результаты по измерению параметров электронных пучков.

Ju. F. PAVLJUTCHENKO, N. Ja. VASILTCHUK

ROTATING SOND METHOD FOR AN INVESTIGATION OF AXIALLY SYMMETRIC ELECTRON BEAMS

S u m m a r y

Rotating sond method for investigation higher power long electronic beams which are focused by magnetic field is devised in this paper.

The technique is described and some correlations for determining axisymmetrical beam contour have been obtained.

Then beams power which would be researched with this method is determined.

The description of the adjustment rotating sond method for investigation beams is present, and some experimental results for measurements electronic beames are also given.