

## ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

УДК 621.318.23:537.533.7

### ОПТИМІЗАЦІЯ ФОКУСУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ ДЛЯ КЛИНОТРОНІВ СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

К. Ільєнко<sup>1</sup>, Ю. Новосел<sup>1</sup>, Т. Яценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України,  
вул. Акад. Проскури, 12, 61085 Харків, Україна  
[k.ilyenko@gmail.com](mailto:k.ilyenko@gmail.com)*

<sup>2</sup> *проїзд Рейгана, 9930, 92126 Сан Дієго, Каліфорнія, США*

Запропоновано використовувати композитну фокусувальну систему з постійних магнітів і вставок із магнітом'якого матеріалу для сучасних компактних вакуумних електронних приладів клинотронного типу субміліметрового діапазону, яка має потенціал поліпшення щонайменше на чверть від маси поточної власної конструкції, зберігаючи необхідне значення супровідного магнітного поля, спрощуючи складання магнітної системи та зменшуючи її загальні габаритні розміри.

*Ключові слова:* фокусувальна система на постійних магнітах; субміліметровий діапазон; вакуумний електронний пристрій; клинотрон.

Компактні вакуумні електронні пристрої субміліметрового діапазону хвиль для різноманітних застосувань потребують оптимальних за масово-габаритними характеристиками магнітних фокусувальних систем. Це привело до того, що постійні магніти на рідкоземельних елементах займають первинні позиції порівняно з соленоїдами в таких сучасних застосуваннях [1–5]. Практичні поширення роботи гребінчастих ламп зворотної хвилі (ЛЗХ) з нахиленим пучком, відомих як клинотрони [6], на довго- та короткохвильову частини субміліметрового (суб-мм) діапазону, окрім питань ефективності пучково-хвильової взаємодії (див, наприклад, [7, 8]), потребують оптимальних за масово-габаритними характеристиками фокусувальних систем на постійних магнітах, що б забезпечували високі значення супровідного магнітного поля. Ми, використовуючи багатий досвід у малосерійному виробництві фокусувальних систем на постійних магнітах, які розробляли в ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України [4], пропонуємо оптимізувати використання магнітом'яких вставок [5] на осі фокусувальної системи на постійних магнітах, що дасть змогу спростити складання елементів магніту (тому намагнічених трансверсально, а не під оптимальними кутами, див. [4]), і вводити більшу кількість магнітного матеріалу, намагніченого поздовжньо, у найвигідніші просторові положення. Це зменшить загальну масу конструкції (для заданої на осі величини супровідного магнітного поля) щонайменше на 25 %, а також загальні розміри магніту у зборі, бо дає

зможу помістити набагато менше магнітного матеріалу на великі поперечні радіальні позиції, де він менш ефективний з погляду масово-габаритних характеристик.

У ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України використовують відомий метод множинного розкладення простору системи постійних магнітів [1, 2] разом з власною розробленою методологією геометричної подібності [4], яка ґрунтується на тому, що магнітне поле в заданій точці простору змінюється зворотно кубу відстані до цієї точки від об'ємного елемента з магнітним матеріалом і одночасно пропорційне об'єму магнітного матеріалу, який створює це магнітне поле. Розрахунки оптимізації перевірені за допомогою пакета CST Electromagnetic Studio [www.cst.com].

Основна перевага запропонованої схеми така: концентратори поля, виготовлені з магнітом'якого матеріалу (заліза) та встановлені в обидва полюси системи (порівняйте з [5]) для уникнення штучних ускладнень вибору оптимальних кутів намагнічування магнітного матеріалу, розташованого в різних місцях фокусувальної системи [1–4], можуть займати не всю відстань уздовж осі кожного полюса, а без втрати їхньої ефективності бути зменшеними до частини осьової відстані, решту цієї осьової відстані можна заповнити магнітним матеріалом, намагніченим в оптимальному (поздовжньому) напрямі. Це або збільшить значення супровідного магнітного поля фокусувальної системи на постійних магнітах, або може бути використане для видалення менш ефективного магнітного матеріалу з інших частин фокусувальної системи, що зменшить її загальну масу та габарити. У разі оптимізації треба приділяти певну увагу і вибору відповідної моделі для концентраторів поля, які виготовляють з заліза, оскільки вони є нелінійними елементами.

Ми вибрали для складання зовнішнього обода (намагнічені перпендикулярно до та від осі системи для лівого і правого полюсів, відповідно) кожного полюса (на рис. 1, *a* показаний лівий полюс)  $N = 8$  однакових сегментних блоків (див. також рис. 2, *a*) з розміром  $l = 30$  мм і змінним зовнішнім діаметром  $D_{ext} = 68\text{--}95$  мм; центральні вставки (симетричні щодо центра системи точки  $C$ ) мають діаметр  $D_{int} = 28$  мм і заповнені концентраторами поля, що виготовлені з заліза, довжиною вздовж осі  $l_i = 15$  мм, решта їхньої довжини  $l - l_i$  заповнена магнітним матеріалом, намагніченим уздовж осі для обох полюсів; товщина зовнішніх концентраторів поля  $t = 2,5$  мм. Стандартний розмір зазора  $d$  фокусувальних систем на постійних магнітах для компактних клинотронів міліметрового та субміліметрового діапазонів довжин хвиль, які виготовляють на вакуумній ділянці відділу вакуумної електроніки ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України, становить 32 мм.

Цей вибір пояснюють такими міркуваннями. Згідно з [1–4], сегментні блоки правого (лівого) зовнішніх ободів повинні бути намагнічені під оптимальними кутами

$$\alpha_{opt} = \arctan(B_{\uparrow} / B_{\rightarrow}) \quad (1)$$

$[B_{\uparrow} (B_{\rightarrow}) - z$ -компонента магнітної індукції, створювана в точці  $C$  (центр фокусувальної системи, див. рис. 1) сегментним блоком, якщо він намагнічений перпендикулярно (уздовж осі  $z$ ],  $\alpha_{opt} = 73\text{--}76^\circ$  (від  $-73$  до  $-76^\circ$ ) відносно додатного напрямку осі  $z$  для їхніх зовнішніх діаметрів  $D_{ext} = 68\text{--}95$  мм, відповідно. Центральні концентратори поля, виготовлені з заліза, фактично роблять непотрібними такі складні для остаточного складання системи напрями намагніченості сегментних блоків зовнішніх ободів [5], і можна мати їх намагніченими під прямим кутом (відповідно до або від лівого і правого полюсів) відносно осі  $z$  системи. З іншого боку, якщо центральні вставки повністю заповнені маг-

нітом'яким матеріалом концентраторів поля (порівняйте з [5]), то відповідний зовнішній діаметр сегментних блоків мав би бути більшим. Для того, щоб досягти таких же значень магнітної індукції, які показані червоною кривою ( $D_{ext} = 95$  мм) на рис. 1, б, необхідно мати  $D'_{ext} = 108$  мм. У цьому конкретному прикладі відносне зменшення об'єму

$$\Delta V_{red} = D'_{ext}{}^2 / D_{ext}{}^2 - 1 \quad (2)$$

запропонованої конструкції фокусувальної магнітної системи на постійних магнітах досягає майже 30 %. Це означає і відповідне зменшення маси, що бажане для передбачуваних застосувань таких оптимізованих магнітних фокусувальних систем.

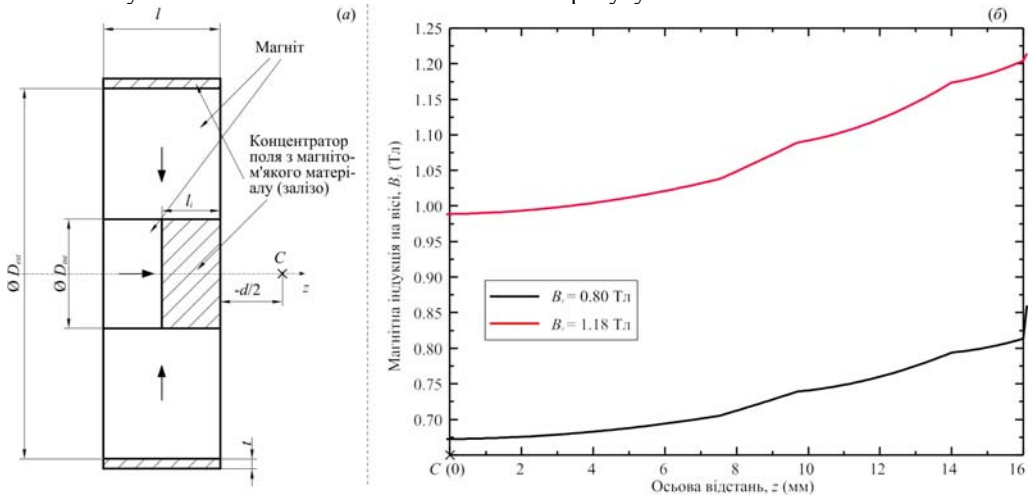


Рис. 1. Схематичне креслення фокусувальної системи на постійних магнітах (а) та розподіл магнітної індукції на осі системи (б). Показані тільки ліва/права половини системи.

Як інженерний критерій ми обираємо принцип однакового питомого внеску до  $z$ -компоненти магнітної індукції у центрі робочого зазору (точка  $C$  на рис. 1) від певної частки магнітного матеріалу [3]:

$$dB_{\alpha, jk}^z / dm_{jk} \equiv \text{const}, \quad (3)$$

де  $dB_{\alpha, jk}^z$  –  $z$ -компонента магнітної індукції, створена магнітним моментом  $dM_{jk} = m^{sp}(\vec{B}_{tot}(\vec{r}_0))dV_{jk}(\alpha_0^j)$  ( $m^{sp}(\vec{B}_{tot}(\vec{r}_0)) \approx \text{const}$ ), який розташований між  $j-1$  та  $j$  променями (полярний кут  $\alpha_0^j$ ), а також між  $k-1$  та  $k$  площинами, перпендикулярними до осі  $z$ ,  $j = \overline{1, J}$  та  $k = \overline{1, K}$ ;

$$dB_{\alpha, jk}^z(\alpha_0^j, z_k; \alpha) = \frac{3\mu_0 \cos^3 \alpha_0^j}{4\pi z_k^3} m^{sp}(\vec{B}_{tot}(\vec{r}_0))dV_{jk}(\alpha_0^j)[b_{\rightarrow j}(\alpha_0^j) \cos \alpha + b_{\uparrow j}(\alpha_0^j) \sin \alpha], \quad (4)$$

$dm_{ij} = \iota dV_{jk}(\alpha_0^j)$ . Тут  $m^{sp}(\vec{B}_{tot}(\vec{r}_0))$  – питомий (вважається майже постійним) магнітний момент магнітного матеріалу, що використовують для конструкції системи фокусування на постійних магнітах;  $\iota$  – густина магнітного матеріалу, яку вважають тут сталою й однорідною;  $\vec{r}_0$  – вектор до центра (точка С на рис. 1) системи фокусування на постійних магнітах від  $jk$ -блоку магнітного елемента  $dm_{ij}$ . Отже, отримуємо

$$\frac{dB_{\alpha,jk}^z}{dm_{jk}} = \iota^{-1} \cos[\alpha - \alpha_{opt}(\alpha_0^j)] \frac{\cos^3 \alpha_0^j}{z_k^3} [b_{\rightarrow j}^2(\alpha_0^j) + b_{\uparrow j}^2(\alpha_0^j)]^{1/2},$$

$$\tan \alpha_{opt}(\alpha_0^j) \equiv \frac{B_{\uparrow j}(\alpha_0^j)}{B_{\rightarrow j}(\alpha_0^j)}. \quad (5)$$

Тут уведено скорочені позначення

$$B_{\rightarrow j} \equiv \frac{3\mu_0 m^{sp}}{4\pi} \frac{\cos^3 \alpha_0^j}{z_k^3} b_{\rightarrow j} = \frac{3\mu_0 m^{sp}}{4\pi} \frac{\cos^3 \alpha_0^j}{z_k^3} [\cos^2 \alpha_0^j - \frac{1}{3}],$$

$$B_{\uparrow j} \equiv \frac{3\mu_0 m^{sp}}{4\pi} \frac{\cos^3 \alpha_0^j}{z_k^3} b_{\uparrow j} = \frac{3\mu_0 m^{sp}}{4\pi} \frac{\cos^3 \alpha_0^j}{z_k^3} \cos \alpha_0^j \sin \alpha_0^j.$$

Це можна пояснити, розглядаючи точковий магнітний диполь  $\vec{m} \equiv (0, m \sin \alpha, m \cos \alpha)$ , розташований у точці простору з координатами  $\vec{r}_0 = (0, -z_k \tan \alpha_0^j, -z_k)$ . Відповідно до (5) і попереднього,

$$\tan \alpha_{opt}(\alpha_0^j) = \frac{\cos \alpha_0^j \sin \alpha_0^j}{\cos^2 \alpha_0^j - 1/3} \equiv \frac{3 \tan \alpha_0^j}{2 - \tan^2 \alpha_0^j}. \quad (6)$$

Можна переконатися: якщо  $\alpha_0^j \rightarrow 0$ , то  $\alpha_{opt}(\alpha_0^j) \rightarrow 0$ , а також якщо  $\alpha_0^j \rightarrow \pi/2$ , то  $\alpha_{opt}(\alpha_0^j) \rightarrow \pi$  тощо, пояснюючи міркування, застосовані у [1, 4]. Тому, без особливої втрати загальності розгляду (за умови  $\alpha \approx \alpha_{opt}(\alpha_0^j)$ ), критерій (3) визначає

$$\frac{\cos^3 \alpha_0}{z^3} (1 + 3 \cos^2 \alpha_0)^{1/2} = P \equiv \text{const},$$

де  $P$  – явно невід’ємний параметр управління, який визначає випуклі поверхні однакового питомого внеску. Оскільки  $\tan \alpha_0 = (x^2 + y^2)^{1/2} / z$  та, відповідно,  $\cos \alpha_0 = z / (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ , то ми отримуємо алгебричне рівняння восьмого порядку для однопараметричної родини цих випуклих поверхонь у вигляді

$$x^2 + y^2 + 4z^2 = P^2 (x^2 + y^2 + z^2)^4.$$

З огляду на циліндричну (щодо осі  $z$ ;  $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$ ) симетрію (яку використовують для більшої наочності в усіх аналітичних викладках і яка уособлює технологічну доцільність у разі виробництва) можна записати  $z = r \cos \alpha_0$ ,  $\rho = r \sin \alpha_0$  ( $r \equiv (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ ), унаочнюючи однопараметричну родину випуклих поверхонь у площині  $z-\rho$  (полярний кут  $\alpha_0$ ) як 'овал' трохи (на множник  $2^{1/3}$ ) витягнутий уздовж осі  $z$ :

$$r^6 = \frac{1}{P^2} (1 + 3 \cos^2 \alpha_0) \equiv \frac{1}{2P^2} (3 \cos 2\alpha_0 + 5).$$

Якщо ж практичні міркування потребують, щоб кути намагнічування сегментних блоків  $\alpha$  (які потенційно мають різні значення для різних  $\alpha_0$ ) суттєво відрізнялися від їхніх відповідних оптимальних значень  $\alpha_{opt}(\alpha_0)$ , то ми знаходимо, що з критерію (3) впливає

$$\cos[\alpha - \alpha_{opt}(\alpha_0)] \frac{\cos^3 \alpha_0}{z^3} (1 + 3 \cos^2 \alpha_0)^{1/2} = P' \equiv \text{const},$$

де невід'ємний параметр управління  $P'$  тепер визначає поверхні однакового питомого внеску. Розраховуючи з (6)

$$\cos \alpha_{opt}(\alpha_0) = \frac{3 \cos^2 \alpha_0 - 1}{(1 + 3 \cos^2 \alpha_0)^{1/2}}, \quad \sin \alpha_{opt}(\alpha_0) = \frac{3 \cos \alpha_0 \sin \alpha_0}{(1 + 3 \cos^2 \alpha_0)^{1/2}},$$

ми отримуємо таку родину поверхонь, які нумерують  $P'$ :

$$\{[2z^2 - (x^2 + y^2)] \cos \alpha + 3(x^2 + y^2)^{1/2} z \sin \alpha\}^2 = P'^2 (x^2 + y^2 + z^2)^5,$$

що тепер містить кут намагнічування  $\alpha$  як додатковий параметр. У площині  $z-\rho$  ( $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$ , полярний кут  $\alpha_0$ ) вона набуває форми

$$r^3 = \frac{1}{2P'} [3 \cos(2\alpha_0 - \alpha) + \cos \alpha].$$

Якщо припустити, що при  $z = L/2$  ( $L$  – загальна довжина фокусувальної системи на постійних магнітах уздовж осі  $z$ ) і що площина  $z = L/2$  торкається магнітної системи під (найменшим) кутом  $\alpha_0 = \alpha_0^*$  ( $\alpha_0^*$  не обов'язково дорівнює нулю), то  $\rho$ -координатою точки(ок) контакту буде  $\rho = L \tan \alpha_0^* / 2$ , і наведене вище рівняння дає змогу, по-перше, обчислити параметр  $P'$  нумерації поверхонь у термінах  $L$ ,  $\alpha_0^*$  і кута намагнічування  $\alpha$  для  $\alpha_0 = \alpha_0^*$ , який нижче позначатимемо як  $\alpha_{\alpha_0^*}$ , і, по-друге, переписати рівняння, наведене вище, у вигляді

$$r = \frac{L}{2} \frac{1}{\cos \alpha_0^*} \sqrt[3]{\frac{3 \cos(2\alpha_0 - \alpha_{\alpha_0}) + \cos \alpha_{\alpha_0}}{3 \cos(2\alpha_0^* - \alpha_{\alpha_0^*}) + \cos \alpha_{\alpha_0^*}}}. \quad (7)$$

Якщо  $\alpha_0^* = 0$ , то (7) узгоджується з рівнянням (3) у [3]. Приклад фокусувальної системи на постійних магнітах з такою формою профілювання полюсів показано на рис. 2.



Рис. 2. Фокусувальна система на постійних магнітах з полюсами профілюваної форми розробки ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України.

Додатково кут 'поділу'  $\alpha_0^{sep}$  для двох можливих кутів намагнічування блоків  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ , за яких є однакові внески

$$b_{\rightarrow}(\alpha_0^{sep}) \cos \alpha_1 + b_{\uparrow}(\alpha_0^{sep}) \sin \alpha_1 = b_{\rightarrow}(\alpha_0^{sep}) \cos \alpha_2 + b_{\uparrow}(\alpha_0^{sep}) \sin \alpha_2$$

до  $z$ -компоненти магнітної індукції (4) в центрі фокусувальної системи на постійних магнітах (точка  $C$  на рис. 1, див. [4])

$$\frac{B_{\uparrow}(\alpha_0^{sep})}{B_{\rightarrow}(\alpha_0^{sep})} \equiv \frac{b_{\uparrow}(\alpha_0^{sep})}{b_{\rightarrow}(\alpha_0^{sep})} = \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1} = \tan \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2},$$

можна розрахувати аналітично з наведеного вище та рівняння (6)

$$\tan \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} = \frac{B_{\uparrow}(\alpha_0^{sep})}{B_{\rightarrow}(\alpha_0^{sep})} \equiv \tan \alpha_{opt}(\alpha_0^{sep}) = \frac{3 \tan \alpha_0^{sep}}{2 - \tan^2 \alpha_0^{sep}} \quad (8)$$

розв'язуючи квадратне рівняння (8) у першому квадранті ( $0 \leq \alpha_0^{sep} < \pi/2$ ):

$$\alpha_0^{sep} = \arctan \left\{ \left[ 2 + \frac{9}{4 \tan^2 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}} \right]^{1/2} - \frac{3}{2 \tan \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}} \right\}. \quad (9)$$

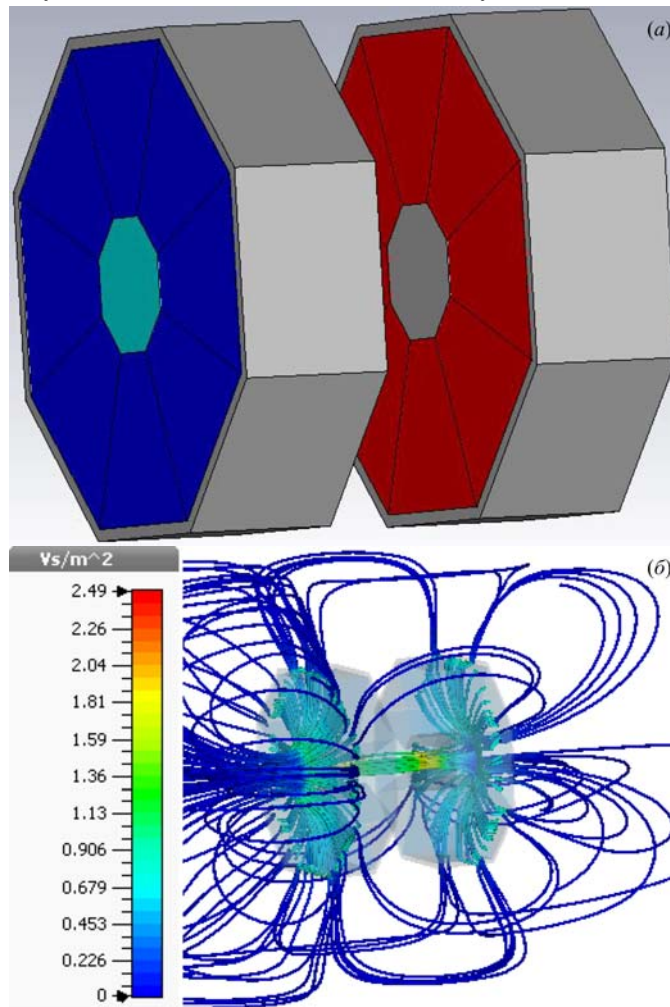


Рис. 3. Два ободи магнітної фокусувальної системи, кожен складається з  $N = 8$  сегментних магнітних полюсів з композитними центральними вставками (а), та наочна ілюстрація розрахунків магнітної індукції (б) у CST солвері. Кольорове маркування магнітної індукції у довільних одиницях тільки для довідки.

У практично важливому випадку  $\alpha_1 = 0$  і  $\alpha_2 = \pi/2$  (див. рис. 1а) рівняння (9) дає  $\alpha_0^{sep} \approx \pi/6$  (порівняйте з [1, рис. 1, 3]).

Для перевірки конструкції в пакеті CST Electromagnetic Studio використовують такі параметри: залишкова намагніченість  $B_r$ , 0,80 та 1,18 Тл; тип магнітом'якого матеріалу концентраторів поля – залізо Steel 1010. 3D-графіка й унаочнення деяких результатів такого моделювання зображені на рис. 3.

Певну роботу потрібно також виконувати для поліпшення, якщо можливо, однорідності поля в робочому зазорі фокусувальних систем на постійних магнітах, які розробляють.

Отже, продемонстровано принципову можливість зменшення на приблизно 25–30 % масово-габаритних характеристик фокусувальних систем на постійних магнітах для субміліметрових клинотронів та інших приладів з торцевим кріпленням катода та колектора, які розробляють у ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. А. с. 513396 СССР, МКЛ<sup>2</sup> Н 01 F 7/00. Магнитная система / Я. Д. Рабинович (СССР). – № 1983433/24–7 ; заявл. 28.12.73 ; опубл. 05.05.76, Бюл. № 17.
2. *Halbach K.* Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material / K. Halbach // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. – 1980. – Vol. 169, N 1. – P. 1–10.
3. *Капитонов В. Е.* Малогабаритные электронно-оптические системы для ЭВП миллиметрового диапазона волн / В. Е. Капитонов, И. В. Лопатин, А. С. Тищенко, А. Х. Худайберганов // Физика и техника миллиметровых и субмиллиметровых волн / [под ред. В. П. Шестопалова]. – Киев : Наук. думка, 1983. – С. 168–176.
4. *Капитонов В. Е.* Метод синтеза оптимальных магнитных систем / В. Е. Капитонов. – Харьков : ИРЭ АН УССР, 1984. – 26 с. – (Препринт / АН УССР, Ин-т радиофизики и электроники ; ИРЭ 256).
5. *Сергеев К. Л.* Малогабаритная система на постоянных магнитах с полем 1.1 Тл / К. Л. Сергеев // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – Т. 52, № 2. – С. 293–294.
6. Клинотрон / [Левин Г. Я., Бородкин А. Я., Кириченко А. Я. и др. ; под ред. А. Я. Усикова]. – Киев : Наук. думка, 1992. – 200 с.
7. *Milcho M. V.* CW clinotrons for the short-wave part of the millimeter waveband / M. V. Mil'cho, I. V. Lopatin, V. V. Zavertanny [et al.] // 15th IEEE International Vacuum Electronics Conference. – Monterey, CA, USA, 2014. – P. 71–72.
8. *Milcho M. V.* Experimental proof-of-principle demonstration of sub-mm clinotron-multiplier / M. V. Milcho, V. V. Zavertanny, K. Ilyenko, A. S. Tishchenko // 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – Hong Kong, SAR PRC, 2015.

Стаття: надійшла до редакції 06.09.2017,  
доопрацьована 13.09.2017,  
прийнята до друку 14.09.2017.



**OPTIMIZATION OF PERMANENT MAGNET FOCUSING SYSTEM  
FOR SUB-MM CLINOTRONS****K. Ilyenko<sup>1</sup>, Yu. Novosel<sup>1</sup>, T. Yatsenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NAS of Ukraine,  
Akad. Proskury St., 12, UA-61085 Kharkiv, Ukraine  
[k.ilyenko@gmail.com](mailto:k.ilyenko@gmail.com)*

<sup>2</sup> *9930 Reagan Rd, San Diego, CA 92126, USA*

We propose to use optimized composite permanent magnet and iron insert focusing system that provides not only for a simpler assembly of the magnet pole pieces but also for insertion of more magnet material magnetized longitudinally into the preferable spatial positions. This has the potential of reducing total mass of the current in-house design (for the same given on-axis value of guide magnetic field) for modern compact submm-waveband clinotrons and other vacuum electron devices under development at the Department of Vacuum Electronics of O. Ya. Usikov IRE NAS of Ukraine by about 25 ÷ 30 per cent while also decreasing the overall size of the magnet assembly as it allows us to put much less magnet material at larger transverse radial positions (where it is much less efficient in terms of mass-dimensional characteristics). To achieve such a goal, we use the known method of multiple decomposition of the permanent magnet system space together with our own developed methodology of geometric similarity based on the fact that magnetic field in a given point of space depends as the inverse cube of the distance to that point from the volume element with magnet material and is simultaneously proportional to the value of the volume of magnet material that creates the magnetic field. Major advantage of the proposed here design lies in the realization of the fact that iron field concentrators inserted in the both pole pieces of the focusing system, and used to avoid manufacturing complications of choosing the optimal magnetization angles for magnet material placed in different spatial positions of the system, may not occupy the total axial distance in each pole piece but can be reduced without loss of their efficiency to a portion of the axial distance whereas the rest of the axial distance could be fitted with magnet material magnetized in the optimal (longitudinal) direction. This either enhances the value of the guide magnetic field in the operational volume of the permanent magnet focusing system or can be used to remove less efficient magnet material from other parts of the permanent magnet focusing system thus reducing its overall mass and dimensions. A certain attention needs to be paid when choosing an appropriate model in optimization efforts as the iron concentrators are nonlinear elements. Optimization calculations were checked using the package CST Electromagnetic Studio.

*Key words:* permanent magnet focusing system; submm-waveband; vacuum electron device; clinotron.