



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-5-12>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.385.6

МНОГОПУЧКОВОЙ СФЕРОТРОН

КУРАЕВ А.А., МАТВЕЕНКО В.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 25 февраля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Предложены два типа сферотрона-диотрона на двусферическом резонаторе (раннее в статье был предложен сферотрон-диотрон с несинхронным взаимодействием на двусферическом резонаторе, где электронный поток в этом генераторе проходит по оси z резонатора от внешней сферы до внутренней и взаимодействует с продольным (осевым) электрическим полем резонатора). Первый тип сферотрона имеет ряд электронных лучей (пучков), проходящих от внешней сферы резонатора к внутренней под углами ϑ относительно оси z резонатора: $\vartheta=0, \pi/8, \pi/4$. Взаимодействие электронов с полем резонатора в нем осуществляется за счет возникновения квадратичных сил в возрастающем в направлении движения электронов поле. Во втором типе сферотрона (обращенном сферотроне) радиальные электронные пучки расположены по полудуге экваториальной плоскости резонатора, а электроны движутся от внутренней сферы к внешней. Взаимодействие в нем осуществляется из-за пространственной фазировки электронов. В обоих типах сферотронов достигим КПД 30 % при сверхбольшой мощности в импульсном режиме и суммарных токах пучков в десятки килоампер. Приведенные в статье данные свидетельствуют о перспективности многолучевого и обращенного сферотрона по следующим показателям: чрезвычайная простота конструкции; не требуется прецизионных решеток или гребенок с шагом, значительно меньшим длины волны; не требуются фокусирующие магнитные системы; обеспечивается электронный КПД 26...45 %. Заметим, что сферотрон – прибор большой мощности (10–100 МВт в импульсе длительностью 1–10 нс), поскольку для поддержания эффективности несинхронного взаимодействия нужна высокая величина напряженности электромагнитного поля, что достигается только при большой мощности прибора.

Ключевые слова: многопучковой генератор, двусферический резонатор, эффективность, несинхронное взаимодействие.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев А.А., Матвеев В.В. Многопучковой сферотрон. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 5-12.

MULTIBEAM SPHEROTRON

ALEXANDER. A. KURAYEV, VLADIMIR. V. MATVEYENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 25 February 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The article proposes two types of multibeam spherotron-diotron based on a two-spherical resonator (an early article suggested a spherotron-diotron with non-synchronous interaction on a bi-spherical resonator, where the electron beam in this generator passes along the resonator z axis from the outer sphere to the inner one and interacts with the longitudinal (axial) electric resonator field). The first spherotron type has electron beams going from outer to inner sphere with slope ϑ about the z -axis: $\vartheta=0, \pi/8, \pi/4$. The electrons interact with the resonator field through the emergence of quadratic forces in the field increasing along the electron motion. The second type (inverted spherotron) has electron beams located in half arc of the equatorial resonator plane, and the electrons move from the inner sphere to the outside. The interaction in it is carried out due to the spatial electron phasing. Both spherotron types achieve efficiency of 30 % at ultra-high pulse power and tens of kiloampere of total beam currents. The data presented in the article indicate the prospects of broad application for the inverted spherotron by the following indicators: extreme ease of design; no precision gratings or combs are required with a step significantly shorter than the wavelength; no focusing magnetic systems are required; electronic efficiency from 26 to 45 % is ensured. Note that the spherotron is fundamentally a high-power device (10-100 MW in a 1-10ns pulse) for in order to maintain the efficiency of non-synchronous interaction, one needs a high strength of the electromagnetic field, which is achieved only with a high-power device.

Keywords: multibeam spherotron, two-spherical resonator, efficiency, non-synchronous interaction.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Multibeam spherotron. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 5-12.

Введение

В статье [1] предложен сферотрон-диотрон с несинхронным взаимодействием [2] на двусферическом резонаторе. Электронный поток в этом генераторе проходит по оси z резонатора от внешней сферы до внутренней и взаимодействует с продольным (осевым) электрическим полем резонатора. В настоящей статье предложены два типа сферотрона-диотрона на двусферическом резонаторе. Первый тип сферотрона имеет ряд электронных лучей (пучков), проходящих от внешней сферы резонатора к внутренней под углами ϑ относительно оси z резонатора: $\vartheta=0, \pi/8, \pi/4$. Взаимодействие электронов с полем резонатора в нем осуществляется за счет возникновения квадратичных сил в возрастающем в направлении движения электронов поле. Во втором типе сферотрона (обращенном сферотроне) радиальные электронные пучки расположены по полудуге экваториальной плоскости резонатора, а электроны движутся от внутренней сферы к внешней. Взаимодействие в нем осуществляется из-за пространственной фазировки электронов. В обоих типах сферотронов достигим КПД 30 % при сверхбольшой мощности в импульсном режиме и суммарных токах пучков в десятки килоампер. Такие токи необходимы для поддержания высокой интенсивности поля в резонаторе, необходимой для обеспечения эффективности несинхронного взаимодействия в сферотроне. С другой стороны, как показано в [1], в связи с отсутствием пространственной группировки при таком типе взаимодействия (т. е. электронные сгустки не формируются) допустимы очень большие токи на один электронный поток (до 20 кА, как показано в [1]).

Поля в резонаторе, условия резонанса, релятивистские уравнения движения электронов

Поля колебаний типа E_{n10} двусферического резонатора могут быть записаны в сферической системе координат r, ϑ, φ в следующем виде [1]:

$$\begin{aligned} E_r &= E_n \cos \omega t \left(\frac{\cos r}{(r)^2} - \frac{\sin r}{(r)^3} \right) \cos \vartheta, \\ E_\vartheta &= \frac{E_n}{2} \cos \omega t \left(\frac{\sin r}{r} + \frac{\cos r}{(r)^2} - \frac{\sin r}{(r)^3} \right) \sin \vartheta, \\ H_\varphi &= -\frac{E_n}{2W^0} \sin \omega t \left(\frac{\cos r}{r} - \frac{\sin r}{(r)^2} \right) \sin \vartheta, \\ W^0 &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} - \text{волновое сопротивление вакуума.} \end{aligned} \quad (1)$$

Резонансные значения радиусов сфер резонатора a и b находятся из условия: $E_\vartheta(a)=0$; $E_\vartheta(b)=0$. Или, используя (3):

$$\begin{aligned} \sin a + \frac{\cos a}{a} - \frac{\sin a}{(a)^2} &= 0, \\ \sin b + \frac{\cos b}{b} - \frac{\sin b}{(b)^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь приняты следующие безразмерные переменные: $r = kr'$, $a = ka'$, $b = kb'$, r' , a' , b' – размерные величины; $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$; λ , ω – рабочая длина волны и угловая частота; c – скорость света в пустоте.

Для удобства расчетов преобразуем составляющие поля резонатора (2) из сферической системы координат r, ϑ, φ в прямоугольную x, y, z :

$$\vec{E} = E_n \vec{e}, \quad H = \frac{E_n}{W^0} \vec{h}, \quad (3)$$

$$\text{где } e_x = (2F_1(r) + F_2(r)) \frac{x \cdot z}{r^2} \cos T,$$

$$e_y = (2F_1(r) + F_2(r)) \frac{y \cdot z}{r^2} \cos T,$$

$$e_z = \left(2F_1(r) \frac{z^2}{r^2} - F_2(r) \frac{\rho^2}{r^2} \right) \cos T,$$

$$h_x = F_3(r) \frac{y}{r} \sin T, \quad h_y = -F_3(r) \frac{x}{r} \sin T,$$

$$F_1(r) = \frac{\cos r}{r^2} - \frac{\sin r}{r^3},$$

$$F_2(r) = \frac{\sin r}{r} + \frac{\cos r}{r^2} - \frac{\sin r}{r^3},$$

$$F_3(r) = \frac{\cos r}{r} - \frac{\sin r}{r^2},$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad x = kx', \quad y = ky', \quad z = kz', \quad T = \omega t.$$

Уравнение движения релятивистского электрона в безразмерных переменных имеет вид

$$\begin{cases} \frac{d\vec{\beta}}{dT} = -A_n \sqrt{1-\beta^2} (\vec{e} + [\vec{\beta}, \vec{h}] - \vec{\beta}(\vec{\beta}, \vec{e})) \\ \frac{d\vec{r}}{dT} = \vec{\beta}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $\vec{\beta} = \vec{v}/c = \vec{v}\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$, $A_n = \frac{E_n e}{m_0 c \omega}$, e , m_0 – соответственно заряд и масса покоя в системе x , y , z электрона.

Начальные условия к системе (2) задаются как $\vec{r}_i(0) = \vec{r}_0$, $\vec{\beta}_i(0) = \vec{\beta}_0$, $T_i(0) = 2\pi i / N$, $i = \overline{1, N}$, i – номер электрона, N – число электронов в ансамбле.

Сферотрон первого типа

Конструкция этого сферотрона приведена на рис. 1.

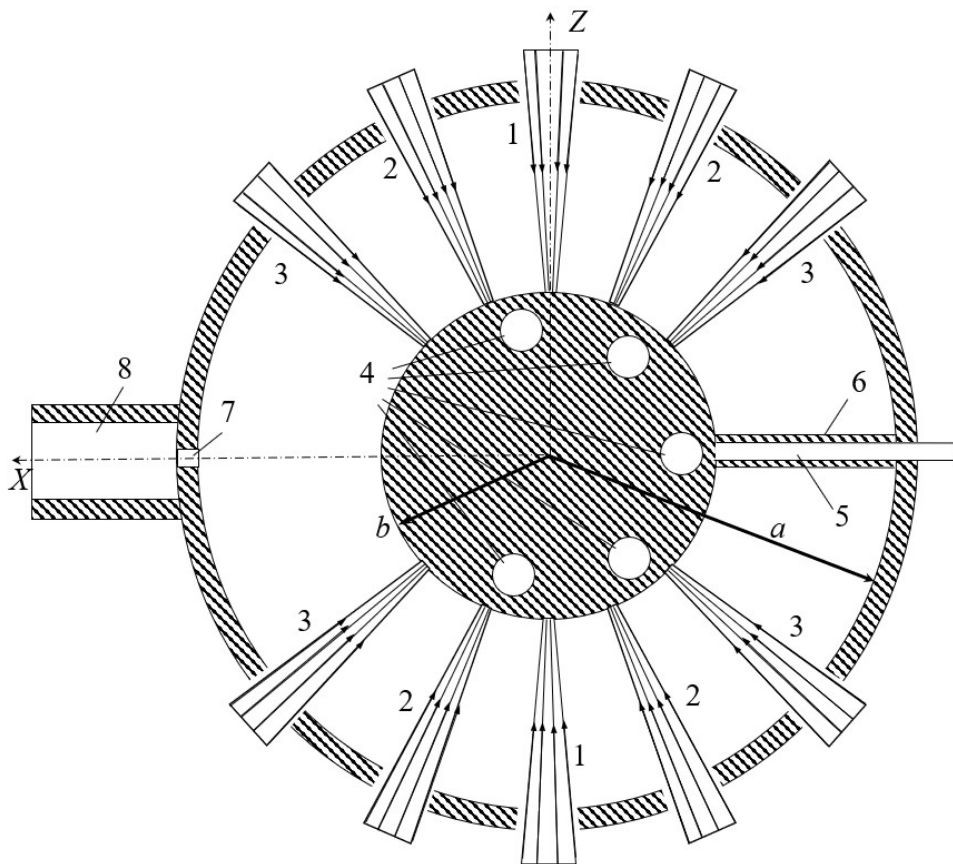


Рис. 1. Схема многопучкового сферотрона
Fig. 1. Multi-beam spherotron scheme

Здесь 1 – электронный луч типа 1 ($\vartheta=0$); 2 – электронные лучи типа 2, расположенные по окружности $\varphi=0\dots 2\pi$ при ($\vartheta=\pi/8$); 3 – электронные лучи типа 3, расположенные по окружности $\varphi=0\dots 2\pi$ при $\vartheta=\pi/4$; 4 – вход в систему охлаждения; 5 – экваториальная металлическая полуплоскость, стабилизирующая колебание E_{n10} резонатора и содержащая канал водяной системы охлаждения 6; 7 – азимутальная щель связи с выходным волноводом (или рупором) 8; a – безразмерный внутренний радиус внешней сферы; b – безразмерный внешний радиус внутренней сферы резонатора.

Результаты расчетов

Вариант 1. Мода резонатора E_{110} ($n=1$); $b=2,7437$, $a=6,1168$. $A=1,0$. Для всех лучей 1, 2, 3 типов $\beta_0=0,29$. Для лучей типа 1 $\eta_e=0,32$, для типа 2 ($\vartheta=\pi/8$) – $\eta_e=0,31$, для типа 3 ($\vartheta=\pi/4$) – $\eta_e=0,23$.

Вариант 2. Колебание резонатора E_{710} ($n=7$); $b=2,7437$, $a=25,0928$. $A=0,45$. Для лучей типа 1 $\beta_0=0,1375$, $\eta_e=0,26$, типа 2 – $\beta_0=0,1375$, $\eta_e=0,26$, для типа 3 – $\beta_0=0,1025$, $\eta_e=0,22$.

Траекторный анализ движения электронов для лучей трех типов показал, что характер взаимодействия для всех из них подобен первому типу. Он достаточно подробно проанализирован в [1], так что повторять выводы статьи [1] нет смысла – характер взаимодействия типичен для несинхронного, пространственных сгустков (фазовых пакетов) электронов не создается.

Сферотрон второго типа (обращенный сферотрон)

Для реализации режима положительной отдачи энергии электромагнитному полю пучками, расположенными в экваториальной плоскости двусферического резонатора, необходимо направление движения электронов пучков от внутренней сферы резонатора к внешней. Такое условие реализуется в обращенном сферотроне, схема которого изображена на рис. 2. Здесь 1 – электронная пушка радиального электронного пучка, 2 – промодулированный в поле резонатора электронный пучок, 3 – полуплоскость, фиксирующая внутреннюю сферу и одновременно осуществляющая селекцию рабочей моды E_{n10} . Через нее также проходят линии электропитания пушек электронных пучков. Электронные пучки имеют начальное цилиндрическое сечение и располагаются по полудуге экваториальной плоскости.

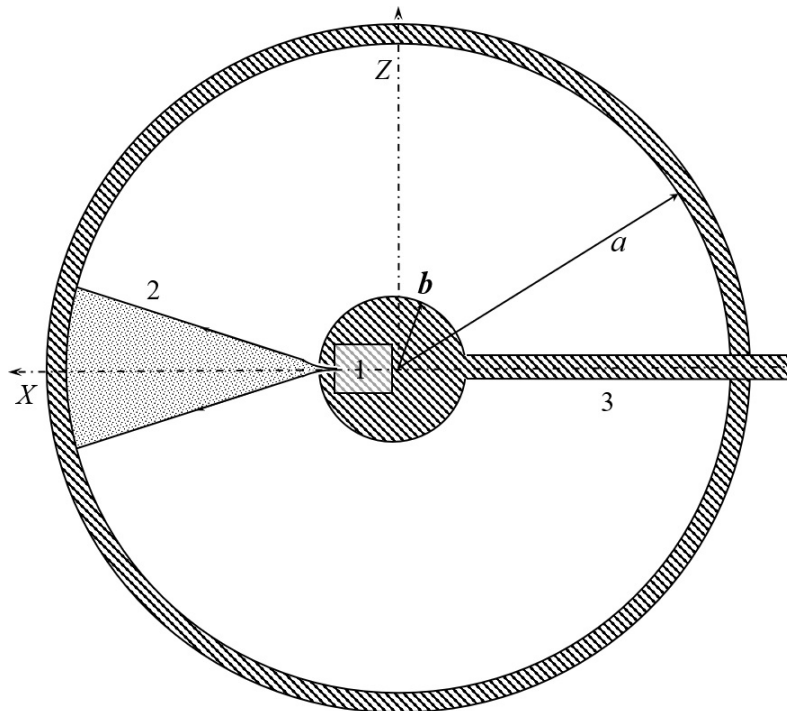


Рис. 2. Схема обращенного сферотрона: 1 – электронная пушка радиального пучка; 2 – динамическое сечение пучка; 3 – металлическая экваториальная полуплоскость

Fig. 2. Inverted spherotron scheme: 1 – radial beam electron gun; 2 – dynamic beam section; 3 – metal equatorial half-plane

На рис. 3 приведены зоны генерации обращенного сферотрона в координатах A_0 , β_0 для колебания E_{110} . Цифры на графике означают КПД на соответствующих линиях уровня зон. Видно, что требуемая амплитуда A_0 в начальных зонах существенно меньше, чем в обычном сферотроне.

На рис. 4 приведены 16 траекторий электронов пучка при $\beta_0=0,12$, $A_0=0,9$ в плоскости X, Z . Эти данные весьма информативны для пояснения механизма взаимодействия электронов с электромагнитным полем в обращенном сферотроне. За счет отклоняющего действия поперечных составляющих сил поля, включая магнитные, электроны получают пространственную фазировку в электрическом поле таким образом, что попадают в тормозящую фазу поля.

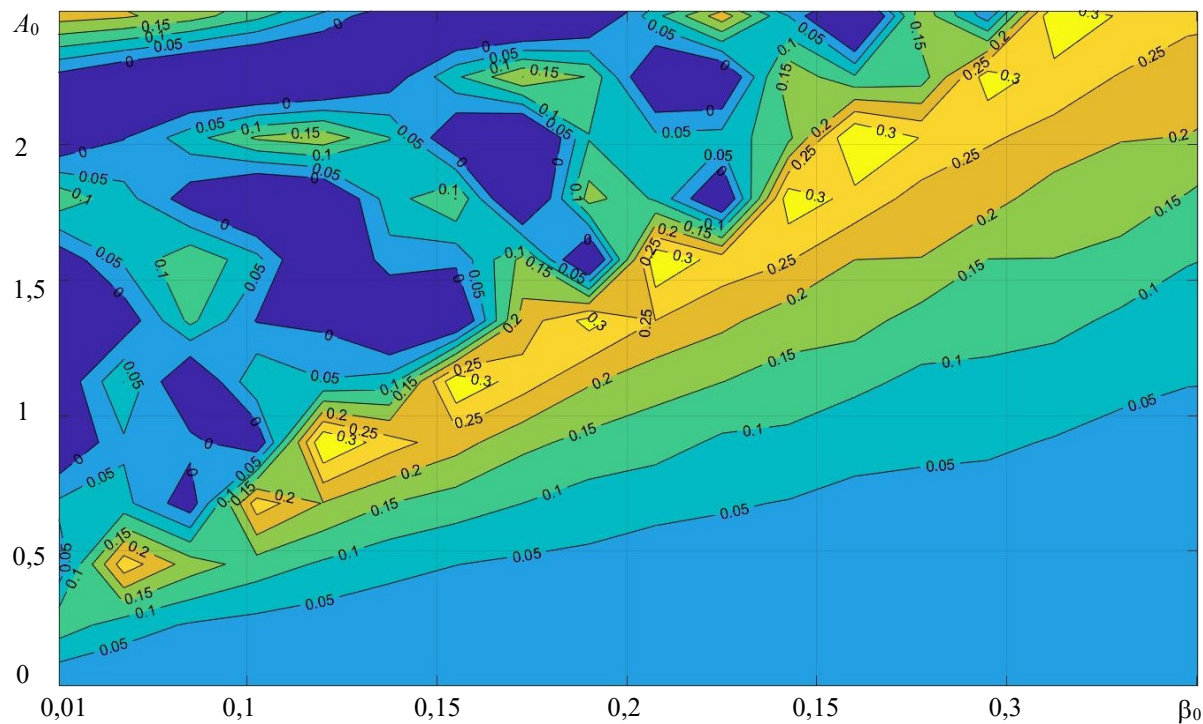


Рис. 3. Зоны для E_{110}
Fig. 3. The zones for E_{110}

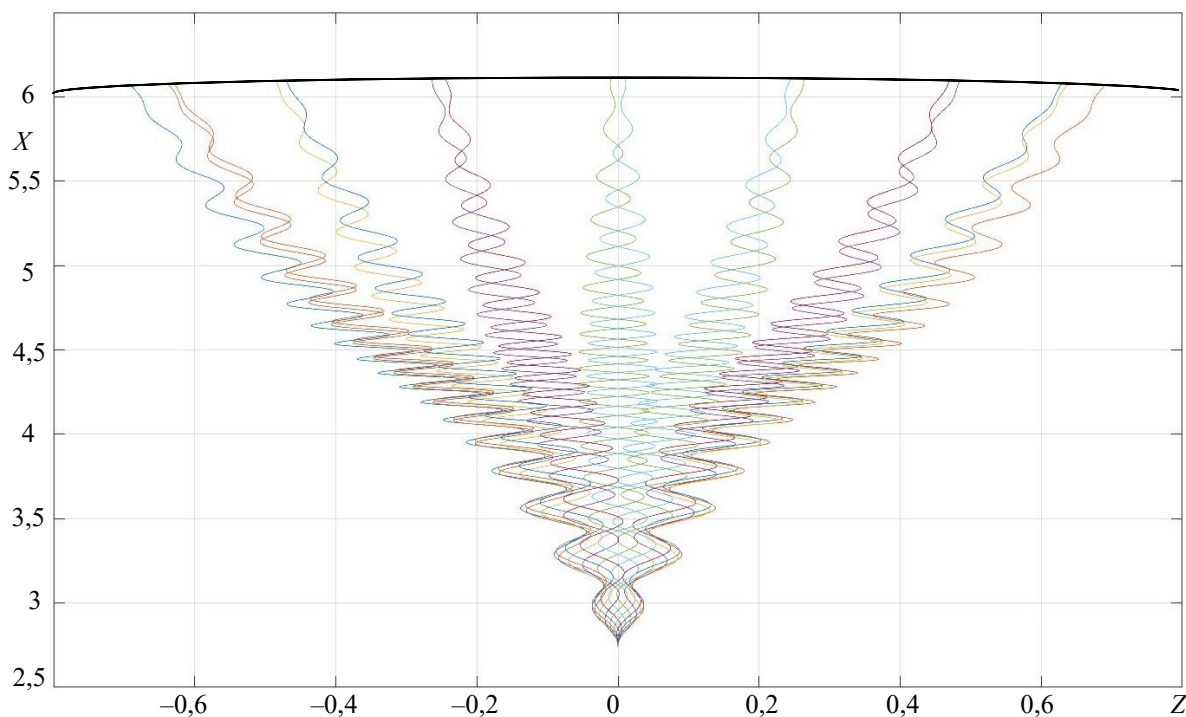


Рис. 4. Траектории электронов при $\beta_0=0,12$, $A_0=0,9$, E_{110}
Fig. 4. The electron paths at $\beta_0=0,12$, $A_0=0,9$, E_{110}

При этом основная часть электронов отдает энергию полю, что иллюстрирует рис. 5, где приведены средний КПД (η_{cp}) и КПД индивидуальных электронов как функция T . В результате в приведенном варианте достигается $\eta_{cp}=36\%$.

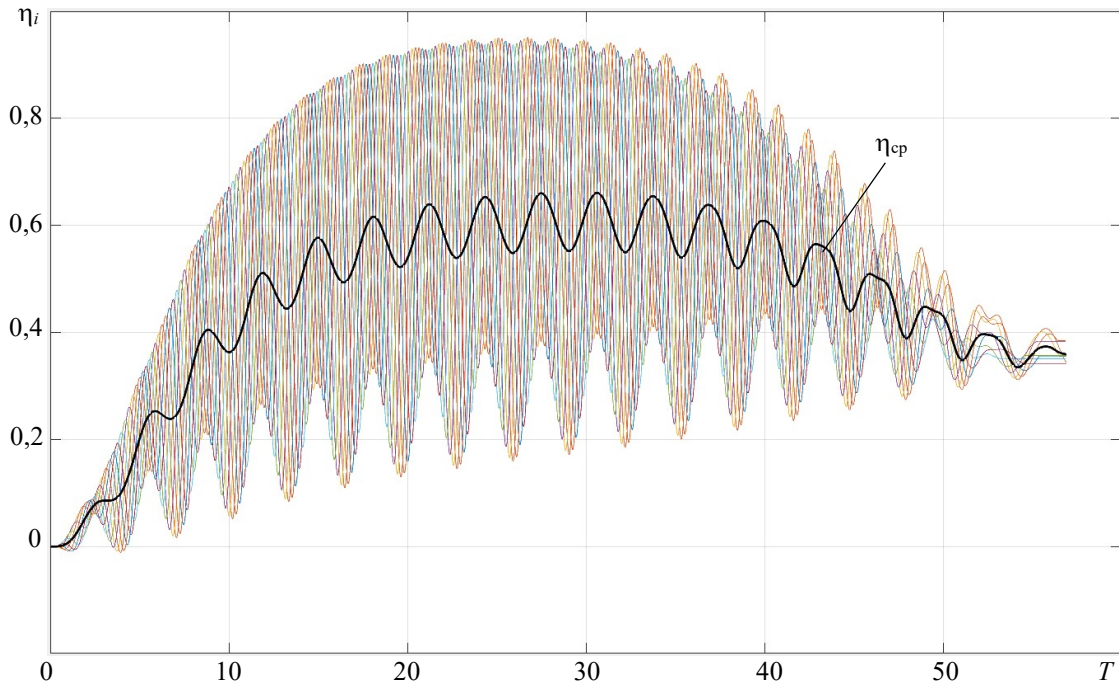


Рис. 5. $\eta_i(T)$, $\eta_{cp}(T)$ при $\beta_0=0,12$, $A_0=0,9$, E_{110}

Fig. 5. $\eta_i(T)$, $\eta_{cp}(T)$ at $\beta_0=0.12$, $A_0=0.9$, E_{110}

Таким образом, механизмы взаимодействия в обычном сферотроне и обращенном не имеют ничего общего: в первом механизм определяют квадратичные силы Миллера, во втором – пространственная фазировка электронов.

Следует указать на следующую возможность: рассматриваемая конструкция обращенного сферотрона может быть преобразована из диотрона в диод. В этом случае электронная пушка отсутствует; вместо нее в экваториальной плоскости внутренней сферы расположен катод в виде полудуги, а между внешней и внутренней сферой приложено напряжение U_a . Предварительные расчеты дали следующий результат:

$$\text{Мода резонатора } E_{110}; A_0=0,3; A_1 = \frac{eU_a}{m_0c^2} \left(\frac{ab}{a-b} \right), A_1=0,01 (U_a \approx 1 \text{ кВ}); \eta_e=0,14.$$

Заключение

Приведенные в статье данные свидетельствуют о перспективности многолучевого и обращенного сферотрона по следующим показателям:

- чрезвычайная простота конструкции, не требуется прецизионных решеток или гребенок с шагом, значительно меньшим длины волны;
- не требуются фокусирующие магнитные системы;
- обеспечивается электронный КПД 26...45 %.

Заметим, что сферотрон – принципиально прибор большой мощности (10–100 МВт в импульсе длительностью 1–10 нс), поскольку для поддержания эффективности несинхронного взаимодействия нужна высокая величина напряженности электромагнитного поля, что достигается только при большой мощности прибора.

Список литературы

1. Кураев А.А., Матвеев В.В. Терагерцовый генератор – сферотрон. *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018;1:389-399.
2. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Сеницын А.К. Несинхронные взаимодействия. *Успехи физических наук*. 2007;177:511-534.
3. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К. *Электродинамика и распространение радиоволн*. Москва: «ИНФРА-М»; 2016.

References

1. Kurayev A.A., Matveyenko V.V. [Teragertsovyy generator – sferotron]. *Infokommunikatsionnyye i radioelektronnyye tekhnologii = Infocommunications and Radio Technologies*. 2018;1:389-399. (In Russ.)
2. Kravchenko V.F., Kurayev A.A., Sinityn A.K. [Nesinkhronnyye vzaimodeystviya]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Advances in Physical Sciences*. 2007;177:511-534. (In Russ.)
3. Kurayev A.A., Popkova T.L., Sinityn A.K. [*Elektrodinamika i rasprostraneniye radiovoln*]. Moscow: «INFRA-M»; 2016. (In Russ.)

Сведения о вкладе авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Author contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвеев В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sci., Professor, Professor of Information Radiotechnologies Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Matveyenko V.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computational Methods and Programming Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293- 89-56;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Кураев Александр Александрович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293- 89-56;
e-mail: kurayev@bsuir.by
Kurayev Alexander Alexandrovich