

Выбор амплитуды магнитного поля реверсной фокусирующей системы для мощного релятивистского многолучевого клистрона с учетом собственного электрического и магнитного поля пучка

А.Н. Дармаев, М.А. Кравченко, С.П. Морев, Э.К. Муравьев, В.М. Саблин

АО «НПП «Торий»

Аннотация: На основе сопоставления результатов численного моделирования и аналитических расчетов проведена оценка влияния собственного магнитного поля релятивистского электронного пучка на его движение в магнитной реверсной фокусирующей системе мощного многолучевого клистрона. Показана необходимость учета собственного магнитного поля электронного потока при выборе амплитуды магнитного поля в реверсной фокусирующей системе мощного многолучевого импульсного клистрона с током парциального электронного потока $I=60$ А и энергией электронов $W=280$ кэВ.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, релятивистский электронный поток, реверсная магнитная фокусирующая система

1. Введение

Одним из направлений развития вакуумной электронной техники является увеличение энергии и тока пучка с целью повышения выходной мощности приборов. При проектировании электронно-оптических систем (ЭОС), например сверхмощных релятивистских клистронов, формирующих интенсивные пучки высоких энергий, зачастую необходим учет не только электрических, но и магнитных полей, создаваемых электронным потоком. Однако численное моделирование пучков с большим числом макрочастиц в протяженных ЭОС с учетом собственного магнитного поля пучка требует больших вычислительных ресурсов. В работе проведено сопоставление результатов расчета транспортировки релятивистского электронного потока с расчетами, основанными на параксиальной модели электронного потока.

2. Расчет и сопоставление результатов

Для сравнения был рассмотрен электронный пучок шестилучевого клистрона с энергией $W=280$ кэВ и суммарным током $I=360$ А в пространстве дрейфа в поле магнитной реверсной фокусирующей системы (МРФС).

Численный расчет, основанный на параксиальной модели электронного потока, проводился путем решения уравнения для границы релятивистского электронного пучка [1]:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + r \left(\frac{\eta B_z(z)}{2\beta_z c \gamma_0} \right)^2 - \frac{K_r}{r} - \left(\frac{r_c^2 \eta B_c}{2\beta_z c \gamma_0} \right)^2 \frac{1}{r^3} = 0, \quad (1)$$

где η – удельный заряд частиц, $\beta_z = \frac{v_z}{c}$, $B_z(z)$ – внешнее магнитное поле, γ_0 – релятивистский фактор, r_c – радиус катода, B_c – магнитное поле в области катода, $K_r =$

$\frac{2I(1-\gamma_0^2 f)}{I_0 \beta_z^3 \gamma_0^3}$ - обобщённый первеанс пучка, $f = \frac{n_i}{n_e}$ - степень нейтрализации, I - ток пучка, $I_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 c^3}{\eta}$ - «релятивистский» ток.

При $f = 0$ и $\gamma_0 \rightarrow 0$ уравнение (1) имеет вид [2]:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{\eta B_z^2(z)}{8U} - \frac{P}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{2}\eta r} - \frac{r_c^4 \eta B_c^2}{8Ur^3} = 0, \quad (2)$$

где P - первеанс нерелятивистского пучка.

Радиальное параксиальное уравнение траектории релятивистской частицы без учета собственного магнитного поля пучка может быть записано в следующем виде:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + r \left(\frac{\eta B_z(z)}{2\beta_z c \gamma_0} \right)^2 - \frac{S}{r} - \left(\frac{r_c^2 \eta B_c}{2\beta_z c \gamma_0} \right)^2 \frac{1}{r^3} = 0, \quad (3)$$

где $S = \frac{2I(1-f(z))}{\gamma_0 \beta_z^3 I_0}$.

Как показал анализ результатов расчетов, представленных на рис.1, несоответствие результатов расчетов по уравнению (2) с численными расчетами, основанными на методе крупных частиц без учета собственного магнитного поля, связано с релятивистским изменением массы электрона.

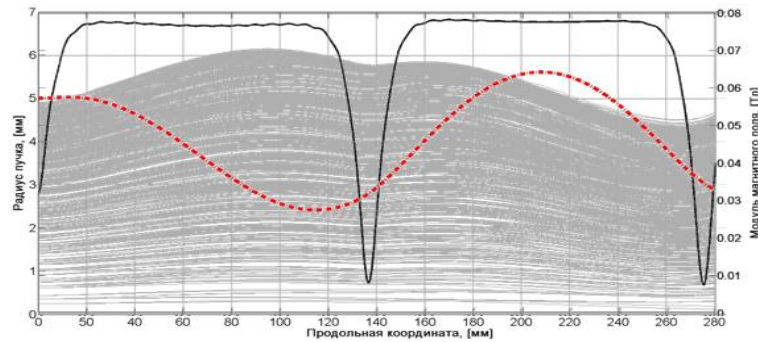


Рисунок 1. Траектории пучка в РМФС, полученные численным моделированием и контур пучка (пунктирная линия), рассчитанный по уравнению (2).

Как показали расчеты, релятивистское изменение массы электрона необходимо учитывать уже при энергиях электронов 0,5 от энергии покоя (511 кэВ).

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показал, что учет релятивистского изменения массы электрона (без учета собственного магнитного поля) приводит к хорошему соответствию результатов по параксиальной модели и по модели крупных частиц.

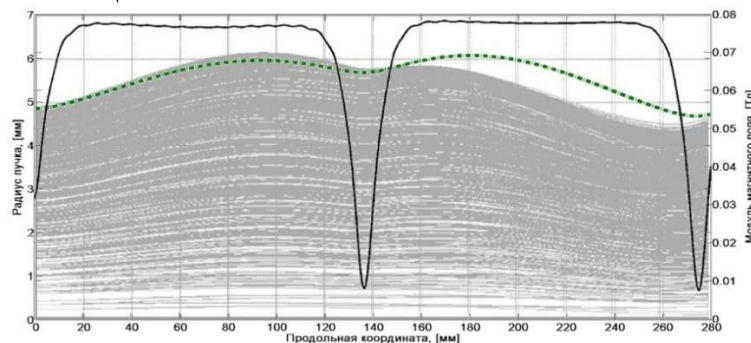


Рисунок 2. Траектории пучка в РМФС, полученные численным моделированием и контур пучка, рассчитанный по уравнению (3).

Однако учет влияния собственного магнитного поля релятивистского электронного пучка при его движении в пространстве дрейфа в том же внешнем магнитном поле приводит к существенному отличию как в значении среднего радиуса пучка, так и в длине волны пульсации. На рисунке 3 изображены огибающие релятивистского пучка, рассчитанные по формулам (1) и (3) и траектории пучка, полученные численным моделированием с учетом собственного магнитного поля пучка.

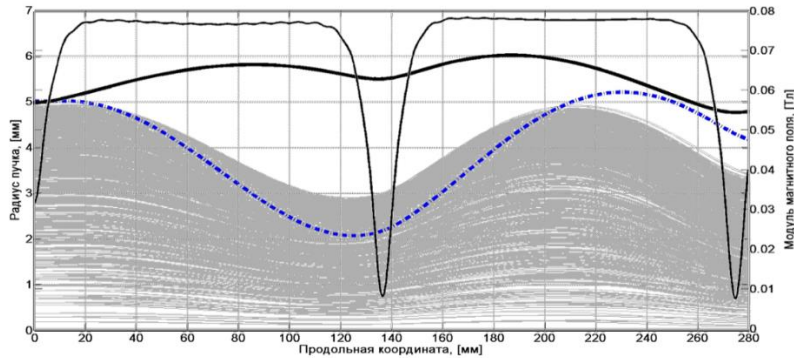


Рисунок 3. Траектории пучка, полученные численным моделированием с учетом собственного магнитного поля пучка и контуры пучка, полученные по уравнениям параксиальной модели: пунктирная линия – уравнение (1), сплошная линия - уравнение(3)

Некоторое отличие в минимальном значении радиуса пучка, полученного численным моделированием и рассчитанного по формуле (1) связано неравномерным распределением плотности тока по сечению пучка. Тем не менее, хорошее соответствие длины волны и фазы пульсаций при транспортировке интенсивных релятивистских пучков позволило найти величину магнитного поля в магнитной реверсной фокусирующей системе на основе аналитических формул.

Формула для расчета магнитного поля, обеспечивающего требуемый равновесный радиус пучка, полученного при полной экранировке катода от магнитного поля, может быть получена из уравнений (1)-(3) (при $\frac{d^2r}{dz^2} = 0$) в следующем виде:

$$B_1 = \frac{2\beta_z \gamma_0 c}{\eta r} \sqrt{K_r} \quad (4a)$$

$$B_2 = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\sqrt{2}UP}{\pi r^2 \varepsilon_0 (\eta)^{\frac{3}{2}}}} \quad (4б)$$

$$B_3 = \frac{2\beta_z \gamma_0 c}{\eta r} \sqrt{S} \quad (4в)$$

На рис. 4 представлены зависимости амплитуды магнитного поля от энергии пучка, для равновесного радиуса $r=5$ мм и тока пучка $I=60$ А. Анализ результатов рис.4 показывал, что при энергиях электронов $\sim 10^5$ эВ необходим учет как релятивистского изменения массы частиц пучка, так и влияния собственного магнитного поля пучка.

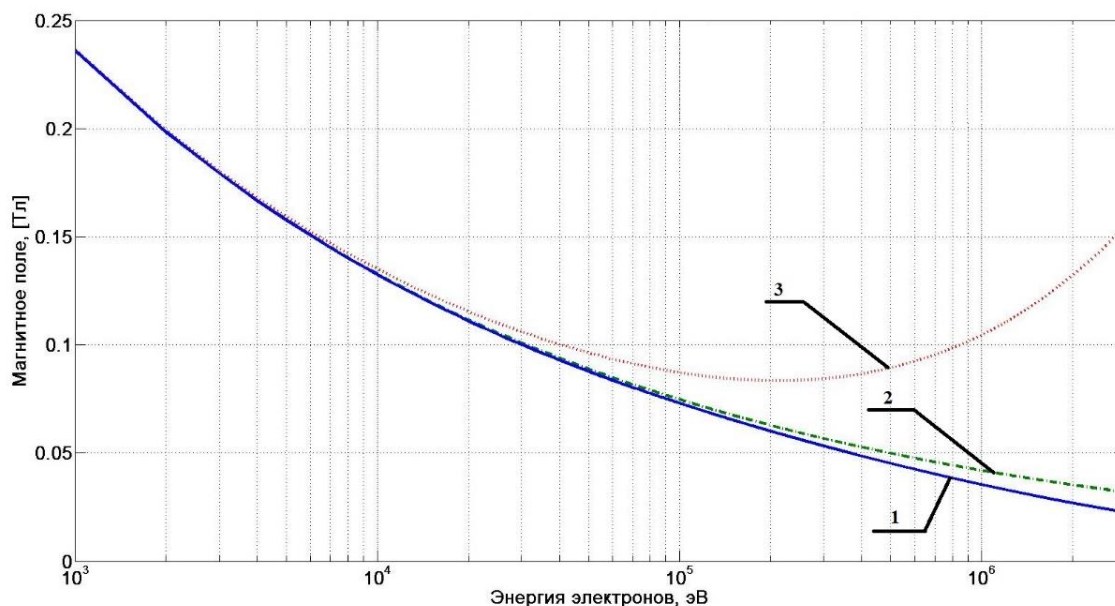


Рисунок 4. Зависимости величины магнитного поля от энергии пучка, рассчитанные по формулам (5.1) – 1, (5.2) – 2 и (5.3) – 3.

3. Заключение

Приведенные в работе расчеты показывают хорошее соответствие между расчетами по уравнению параксиального приближения с учетом релятивистского изменение массы электрона и учетом фокусировки пучка собственным магнитным полем с численным моделированием траекторий на основе метода крупных частиц. Полученные результаты позволяют оценить степень ошибки расчетов траекторий, выполненных без учета релятивистских эффектов и эффекта самофокусировки, а также определить уровень внешних полей, необходимых для транспортировки электронного потока в пролетном канале сверхмощных релятивистских многолучевых клистронов.

Список литературы

1. Цимринг, Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков; [перевод с англ.] / Ш. Е. Цимринг. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2012. - 576 с.
2. Силадьи, М. Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. / М. Силадьи. – М.: «Мир», 1990.-639 с.
3. Беломытцев, С. Я. Физика сильноточных пучков заряженных частиц / С. Я. Беломытцев, И.В. Пегель - Томск: - Изд-во Томского политехнического университета, 2008 – 115 с.