

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
МАГНИТНЫМИ СПИРАЛЬНЫМИ КВАДРУПОЛЬНЫМИ ЛИНЗАМИ**

Г. И. СТАНЕВКО, Н. В. ТРИХАНОВА, П. М. ЩАНИН

(Представлена научным семинаром кафедры вычислительной техники)

В связи с разработкой источников высокоинтенсивных пучков электронов в последнее время усилился интерес к вопросу о транспортировке и фокусировке интенсивных электронных пучков [1]. В данной работе рассмотрена возможность фокусировки интенсивного электронного пучка спиральными квадрупольными линзами (СКЛ); исследовано поведение пучка при изменении тока пучка и тока линзы, а также при изменении амплитуды и формы импульса ускоряющего напряжения. Так как ускоряющее напряжение представляет собой последовательность импульсов с малой длительностью (порядка нескольких микросекунд) и невысокой частотой повторения, то для уменьшения мощности целесообразно применить для линзы импульсное питание. Поэтому желательно выбрать такую систему, которая обладала бы по возможности малой индуктивностью.

Исследования проводились в двух вариантах: без учета продольного магнитного поля и с учетом продольного поля СКЛ. При исследовании рассматривалась система со следующими параметрами: диаметр катода — 100 мм, диаметр электропровода — 140 мм, длина электропровода — 150 см, ток пучка — 50 ка, энергия электронов — 1 Мэв. Предполагается, что эмитанс пучка на входе в электропровод равен нулю. Такое предположение справедливо для высокоинтенсивного пучка, так как существенное влияние на поведение пучка оказывает действие пространственного заряда, а не начальное распределение углов расходимости [4].

На первом этапе рассматривался параллельный пучок на входе, и была поставлена задача: выбрать параметры фокусирующей системы, обеспечивающей прохождение пучка по электропроводу без потерь; на выходе необходимо получить параллельный пучок (или близкий к параллельному) с диаметром 100 мм.

Исследование проводилось путем решения уравнений огибающих пучка на аналоговой вычислительной машине (АВМ) типа МПТ-9 в сочетании с машиной МН-7 и комплектом нелинейных блоков НБН-1. Для выбранных в результате моделирования вариантов выполнялось более точное решение на цифровой вычислительной машине (ЦВМ) типа БЭСМ-4.

Спиральную квадрупольную линзу можно получить из обычной симметричной квадрупольной линзы, если с изменением продольной ко-

ординаты полюса обычной линзы будут равномерно поворачиваться вокруг оси линзы с некоторым шагом, определяющим период системы. В данном случае рассматривалась неявнополюсная линза, образованная проводниками с током, описывающими левую спираль, то есть вращение осуществлялось против часовой стрелки.

Уравнения огибающих пучка в СКЛ без учета продольного магнитного поля имеют вид [2]:

$$\begin{aligned}\frac{d^2x}{d\tau^2} + Q(x \cos 4\pi\tau - z \sin 4\pi\tau) - \frac{2r_a^2}{x+z} &= 0; \\ \frac{d^2z}{d\tau^2} + Q(z \cos 4\pi\tau + x \sin 4\pi\tau) - \frac{2r_a^2}{x+z} &= 0,\end{aligned}\quad (1)$$

где

$$Q = \frac{2S^2\mu_0 \sqrt{\frac{e}{m_0}} I_{\text{л}}}{\pi r_{\text{м}}^2 \left[U \left(1 + \frac{eU}{2m_0 c^2} \right) \right]^{1/2}},$$

$$r_a^2 = \frac{S^2 I_{\text{n}}}{\sqrt{\frac{2 \cdot 10^7}{c^2}} \cdot \sqrt{\frac{e}{m_0} \left[U \left(1 + \frac{eU}{2m_0 c^2} \right) \right]^{3/2}}};$$

r_a^2 — параметр с пространственным зарядом;

τ — безразмерная переменная, выраженная в единицах периодичности, $\tau = \frac{y}{S}$, где y — продольная координата, s — длина периода системы;

I_{n} — ток пучка;

$I_{\text{л}}$ — ток линзы;

U — ускоряющее напряжение;

$r_{\text{м}}$ — максимально возможный радиус пучка;

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума;

e, m_0 — заряд и масса электрона.

Структурная схема для решения системы (1) на АВМ и методика моделирования описаны в работе [3]. Решение на ЦВМ системы нелинейных уравнений осуществлялось методом Рунге-Кутты.

В процессе исследования изменяли фокусирующую силу и периодичность системы. При каждом фиксированном значении τ , изменяя фокусирующую силу, добивались, чтобы поперечные размеры пучка не превышали радиус электропровода, а параметры пучка на выходе системы были равны параметрам пучка на входе в систему. Результаты решения системы (1) на ЦВМ для наиболее оптимального значения $\tau=10$ и $I_{\text{n}}=50$ ка при различных значениях токов линзы сведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при изменении тока линзы размеры пучка меняются медленно. Результатов, отвечающих требованиям поставленной задачи, получено не было, максимальные размеры пучка в плоскости xu и zu превышают на 50—60 мм в среднем радиус трубы $r_{\text{м}}=70$ мм. В этом случае необходимо увеличить $r_{\text{м}}$ и подобрать значение τ и величину тока в линзе. Наиболее удовлетворительный результат был получен при $I_{\text{л}}=18,5$ ка и $\tau=10$. Для этого случая построена огибающая пучка в плоскости xu и в плоскости zu (рис. 1). Из анализа рис. 1 можно заметить, что пучок в плоскостях xu и zu не-

симметричен, то есть одновременного уменьшения размеров пучка в плоскостях xu и zu не происходит.

Были проведены исследования для установления допусков на изменение тока линзы. Обнаружено, что радиус пучка увеличивается на 20% при уменьшении на 10% и при увеличении на 30% тока линзы. При изменении ускоряющего напряжения на 2% от номинального значения

Таблица 1

№ п.п.	I_L [а]	$X_{\max}$ [мм]	$Z_{\max}$ [мм]	X_k [мм]	Z_k [мм]
1.	19500	114	131	95	87
2.	19000	123	125	75	91
3.	18500	119	118	52	78
4.	18000	121	115	20	33
5.	17500	123	121	29	18
6.	17000	125	123	71	22
7.	16500	126	121	108	42
8.	16000	128	115	127	62
9.	15500	129	106	117	72
10.	15000	129	125	91	69
11.	14000	134	131	27	37
12.	10000	182	169	76	54
13.	7000	272	250	238	239

параметры пучка изменяются незначительно. Уменьшение ускоряющего напряжения на 14% вызывает изменение размеров пучка в канале и на выходе канала на 10%. По этим данным можно определить требования к стабильности питающего напряжения.

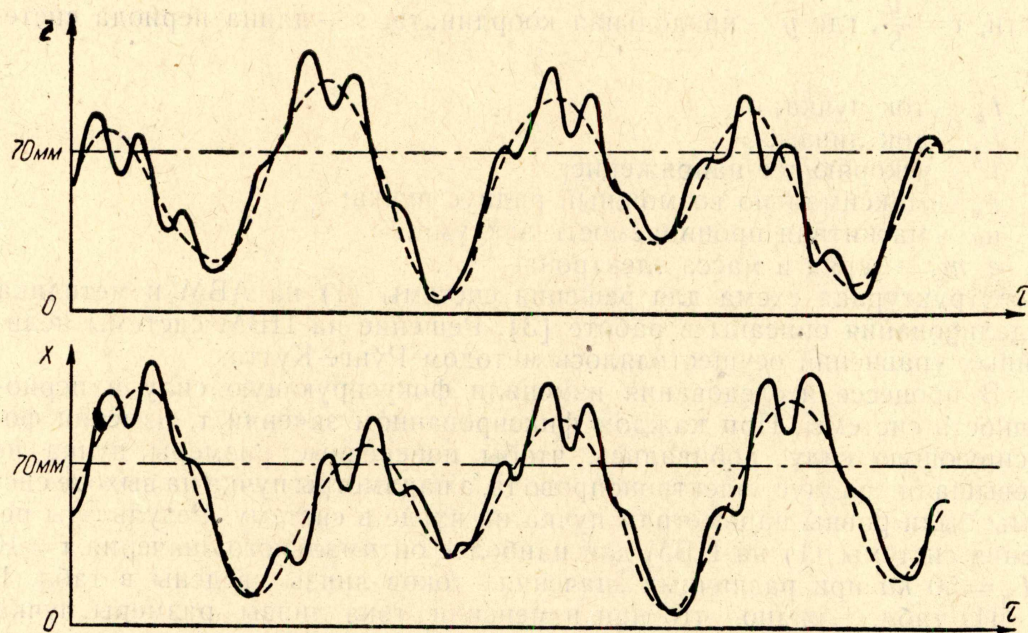


Рис. 1. Огибающие пучка в плоскостях xu и zu при $I_L=18,5$ ка и $\tau=10$.

Для выяснения возможности фокусирующей системы интересно знать зависимость тока линзы от тока пучка. Эта зависимость была установлена решением системы уравнений (1) при различных значениях тока пучка. Для каждого фиксированного значения тока пучка подбиралось значение тока линзы, при котором пучок на выходе сис-

темы удовлетворяет заданным требованиям. На рис. 2 представлены графики зависимости $I_{\text{л}} = f(I_n)$ и числа когерентных колебаний огибающих пучка, укладываемых на длине 1,5 м, от тока пучка: $\nu = F(I_n)$. Из рис. 2 видно, что зависимость тока линзы от тока пучка является нелинейной. При некотором значении тока пучка происходит «насыщение», то есть увеличение тока линзы непропорционально увеличению тока пучка.

Нетрудно заметить (рис. 1), что огибающая пучка совершает сложные колебания. Прежде всего, имеются некогерентные колебания, частота которых совпадает с частотой фокусирующего поля (сплошная линия на рис. 1). Частота когерентных колебаний (пунктирная линия на рис. 1) в несколько раз меньше частоты фокусирующего поля и изменяется в зависимости от плотности тока пучка, что согласуется с

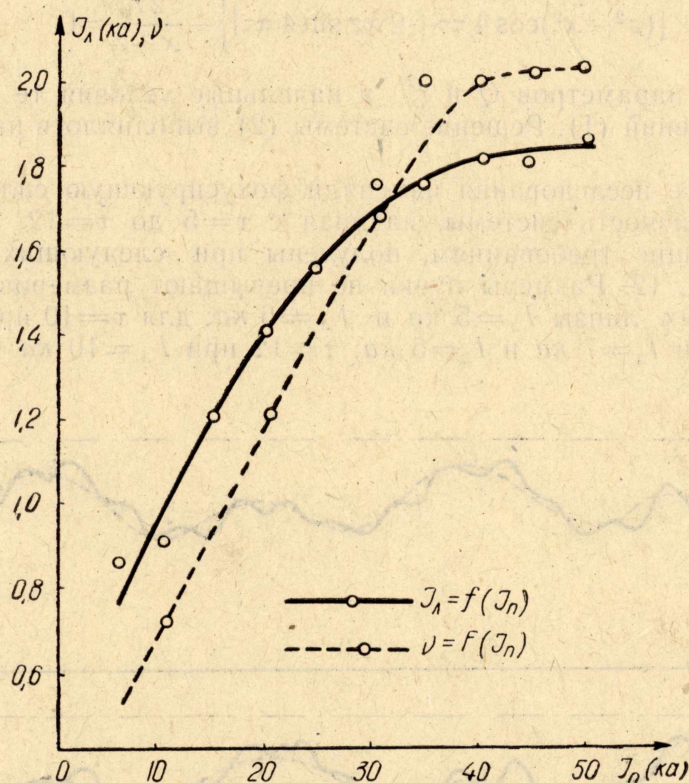


Рис. 2 Графики зависимостей тока линзы и числа колебаний от тока пучка.

теорией [4]. При значениях тока пучка меньше 30 ка частота когерентных колебаний линейно растет с увеличением тока пучка. При значениях тока пучка, больших 30 ка, увеличение частоты когерентных колебаний незначительное (рис. 2). Из рис. 2 видно, что зависимость числа когерентных колебаний, укладываемых на длине 1,5 м от тока пучка $\nu = F(I_n)$, имеет участок «насыщения» (при $I_n = 30$ ка), аналогичный участок на кривой $I_{\text{л}} = f(I_n)$. Такое поведение огибающей характерно для «несогласованного» пучка, что вызвано действием пространственного заряда.

Для $\tau = 10$, $I_n = 50$ ка и $I_{\text{л}} = 18,5$ ка было выполнено решение с углами расходимости, отличными от нуля. При сходящемся пучке на входе, а именно при начальных углах расходимости, равных -10° и -20° , фокусировка пучка улучшилась, пучок проходит через электропровод без потерь, и его параметры на выходе близки к требуемым.

В СКЛ, кроме квадрупольных полей, создается продольное магнитное поле, которое оказывает добавочное фокусирующее действие на пучок. Уравнения огибающих электронного пучка в СКЛ с учетом продольного магнитного поля запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{d\tau^2} + Q \left\{ (z \sin 4\pi\tau + x \cos 4\pi\tau) - \frac{dz}{d\tau} \cdot \frac{2\pi}{S^2} \times \right. \\ \left. \times [(z^2 - x^2) \cos 4\pi\tau + 2xz \sin 4\pi\tau] \right\} - \frac{2r_a^2}{x+z} = 0; \\ \frac{d^2z}{d\tau^2} + Q \left\{ (z \cos 4\pi\tau + x \sin 4\pi\tau) + \frac{dx}{d\tau} \cdot \frac{2\pi}{S^2} \times \right. \\ \left. \times [(z^2 - x^2) \cos 4\pi\tau + 2xz \sin 4\pi\tau] \right\} - \frac{2r_a^2}{x+z} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Значение параметров Q и r_a^2 и начальные условия те же, что и в системе уравнений (1). Решение системы (2) выполнялось на ЦВМ типа БЭСМ-4.

В процессе исследования изменяли фокусирующую силу (ток линзы) и периодичность системы, начиная с $\tau=5$ до $\tau=12$. Результаты, удовлетворяющие требованиям, получены при следующих значениях τ : 8, 9, 10, 11, 12. Размеры пучка не превышают размеров трубы для $\tau=9$ при токах линзы $I_L=5$ ка и $I_L=6$ ка; для $\tau=10$ при $I_L=5$ ка, для $\tau=11$ при $I_L=7$ ка и $I_L=5$ ка; $\tau=12$ при $I_L=10$ ка и $I_L=5$ ка.

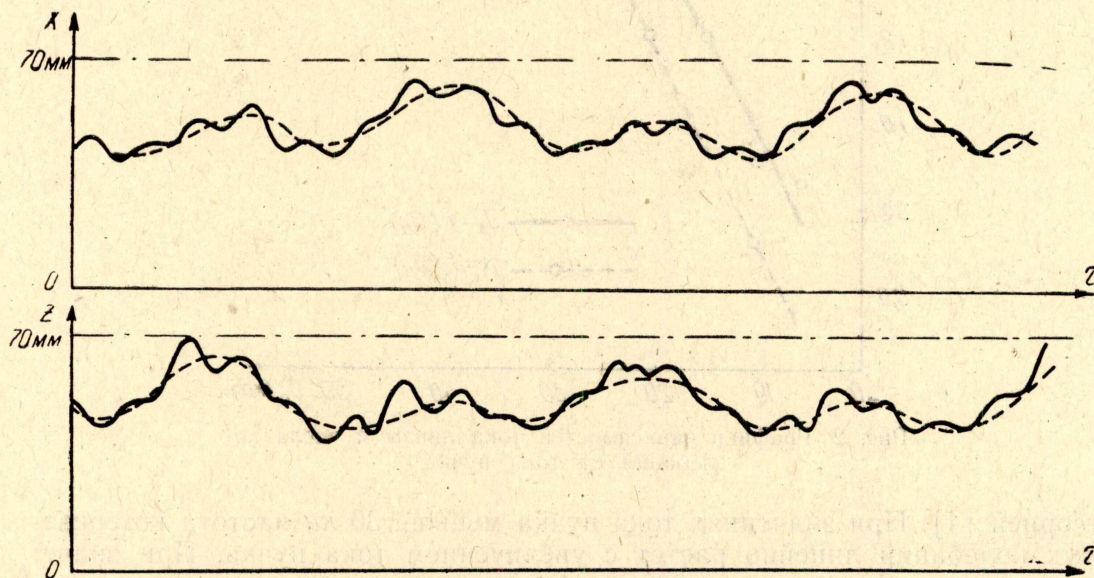


Рис. 3. Огибающие пучка в плоскостях xy , xz , полученные с учетом действия продольного магнитного поля СКЛ

Для $\tau=8$ результат, близкий к требованиям, был получен для $I_L=5$ ка. При этом максимальные значения $z=61$ мм, $x=70$ мм, т.е. в плоскости xy размер пучка равен радиусу трубы. Для $\tau=7$ при $I_L=5$ ка и $I_L=4$ ка максимальные размеры пучка на 4–5 мм превышают радиус трубы, т.е. при $\tau=7$ некоторая часть электронов будет потеряна при транспортировке. При $\tau=5$ и $\tau=6$ удовлетворительных результатов не было получено, размеры пучка превышали радиус трубы при любых значениях тока линзы.

При исследовании было замечено, что при $\tau=5$ и $\tau=6$ значения координат x , z в зависимости от тока линзы меняются «быстрее», чем при $\tau=9 \div 12$, т.е. при увеличении τ чувствительность системы к токам линзы становится меньше. Таким образом, чем больше τ , тем нестабильность питания линз будет меньше сказываться на системе фокусировки.

Была исследована возможность фокусировки пучка при начальных углах расходимости, равных 10 , 20 , -10 , -20° . Если сравнить результаты, полученные с указанными начальными углами, с результатами при параллельном пучке на входе, то видим, что в самом худшем варианте фокусировка ухудшалась на 18% , в самом лучшем варианте при начальном угле расходимости $+10$ — ухудшалась на 3% .

Из анализа огибающих пучка в плоскости xy и zy , представленных на рис. 3, можно сделать вывод, что размах колебаний уменьшился по сравнению со случаем, когда не учитывается действие продольного магнитного поля СКЛ. Характер колебаний остался прежним.

Сравнивая результаты решения систем уравнений (1) и (2), можно сделать вывод, что продольное магнитное поле спиральной квадрупольной линзы существенно влияет на размеры пучка, улучшая его фокусировку. В результате решения системы (2) получены значения токов линзы и τ , при которых поперечные размеры пучка не превосходят радиус трубы, т.е. параметры пучка удовлетворяют заданным требованиям. Значения токов в линзах при этом меньше в 3 раза, чем в лучших вариантах, полученных при решении системы (1). Анализ результатов решения системы (2) показывает, что число периодов τ , т.е. число витков спиральной линзы, можно уменьшить до 8 или 7, упростив таким образом фокусирующую систему. Меньшее число периодов обеспечивает меньшее значение индуктивности СКЛ, что очень важно при импульсном питании линз.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Рухадзе, В. Г. Рухлин. Инжекция релятивистского электронного пучка в плазму. ЖЭТФ, т. 61, вып. 1(7), 1971.
2. С. Я. Явор. Фокусировка заряженных частиц квадрупольными полями. М., Атомиздат, 1969.
3. Н. В. Триханова, Л. В. Пильгер, П. М. Шанин. Исследование на АВМ фокусировки интенсивного электронного пучка квадрупольными полями. Известия ТПИ, т. 258.
4. И. М. Копчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М., Атомиздат, 1966.