

01;10
©1992

РАСЧЕТ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ГРУППИРОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*Б.И.Исламов, Н.А.Какурина,
Г.А.Радюк, Э.Н.Расулов*

Наряду с известными деталями расчета параметров группирователя электронного пучка с поворотным магнитным полем рассматривается вариант расчета величины фокусирующего магнитного поля и группируемого тока. В предложенном варианте расчета индукция фокусирующего поля вычисляется из условия равенства длины волны поперечных колебаний электронов длине петли группирователя. При этом условии выполняется основное требование к траекториям электрона с разными энергиями. Приводятся примеры расчета группирователя релятивистского электронного пучка.

Генераторы СВЧ колебаний большой мощности основаны на преобразовании энергии сильноточных электронных пучков. При этом непрерывный пучок ускоренных электронов необходимо сгруппировать в последовательность сгустков, подаваемых в резонатор. Получение группировки электронов может быть осуществлено либо клистронным методом, либо с использованием поворотного магнита. В случае использования пучка релятивистских электронов целесообразно применение второго способа [1,2].

Работа группирователя с использованием поворотного магнитного поля рассматривалась в ряде работ (см., например, [3,4]). Существует также действующий группирователь [5].

Однако большинство параметров, определяющих работу группирователя, находится моделированием на ЭВМ и из-за большого количества поисков их оптимальных значений затруднен.

Здесь мы покажем, каким образом можно оценить величины этих существенных параметров группирователя. Напомним сначала известные детали расчета. Величина поворотного поля определяется размерами группирователя (радиусом поворота электронов)

$$B[T] = 0.17 \cdot 10^{-2} \sqrt{\gamma^2 - 1} / R[M].$$

Частота модулирующего генератора и глубина модуляции не являются независимыми параметрами. Эту связь можно найти следующим образом. Электроны с максимальной и минимальной энергиями войдут

в петлю группирователя в разное время. Эта разница во времени составляет половину периода ВЧ модулятора

$$\Delta t = t/2 = 1/2\nu.$$

Для того, чтобы эти электроны вышли из петли в одно время, необходимо заставить их двигаться с разными радиусами поворота $R + \Delta R$ и $R - \Delta R$, определяемыми условием

$$\Delta R = \Delta t \cdot U/4\pi = c\sqrt{\gamma^2 - 1}/8\pi\nu\gamma,$$

где U — скорость электронов, c — скорость света.

Разница в радиусах поворота, равная ΔR , возникает, если энергии электронов будут отличаться на величину $\Delta\gamma$,

$$\Delta R = \frac{0.17 \cdot 10^{-2}}{B} \gamma \Delta\gamma / \sqrt{\gamma^2 - 1} = R\gamma \Delta\gamma / \gamma^2 - 1.$$

Теперь можно связать частоты модуляции с ее глубиной

$$\Delta\gamma = c \cdot (\gamma^2 - 1) \sqrt{\gamma^2 - 1} / 8\pi\gamma^2\nu R.$$

Если заданы частота модуляции ($\nu = 3000$ МГц) и радиус магнита ($R = 0.5$ м), тогда, например, для энергии электронов $W = 1$ МэВ глубина модуляции составит $\Delta\gamma = 0.02$ и для $W = 5$ МэВ $\Delta\gamma = 0.08$. В энергетических единицах это означает, что изменение энергии электронов в модулирующем резонаторе должно составить согласно

$$\Delta W = \Delta\gamma \cdot E_0,$$

где E_0 — энергия покоя электронов, ± 10 и ± 40 кэВ для энергии электронов $W = 1$ и 5 МэВ соответственно.

Изменением глубины модуляции можно получить группировку не обязательно на выходе из петли при $\theta = 360^\circ$. Если группировку необходимо сделать раньше, например при $\theta = 180^\circ$, то глубину модуляции необходимо увеличить вдвое.

Изменение радиуса $\pm\Delta R$ при вариации энергии $\pm\Delta\gamma$ в модулирующем резонаторе составит для рассматриваемого группирователя ± 0.4 см. Эта величина практически не будет зависеть от энергии электронов, если ускоритель работает в релятивистском диапазоне, поскольку величину ΔR определяет скорость электронов (при фиксированной частоте модулирующего генератора), которая изменяется незначительно при изменении энергии электронов.

Обратимся теперь к выбору величины фокусирующего магнитного поля. Для простоты рассмотрим движения электронов с тремя различными энергиями E и $E \pm \Delta E$. Поворотное поле выбирается таким образом, что электроны со средней энергией E движутся вдоль оси симметрии магнитного фокусирующего поля с радиусом R . Тогда электроны с энергиями $E \pm \Delta E$ будут двигаться с радиусами $R \pm \Delta R$, отклоняясь от оси симметрии (рис. 1, а). На рис. 1, б показаны эти траектории в координатах R, θ (кривые 1 и 2). Если частица отклоняется от оси симметрии фокусирующего поля, то она будет совершать колебания относительно этой оси. По условию работы группирователя нужно, чтобы частицы, отклонившиеся

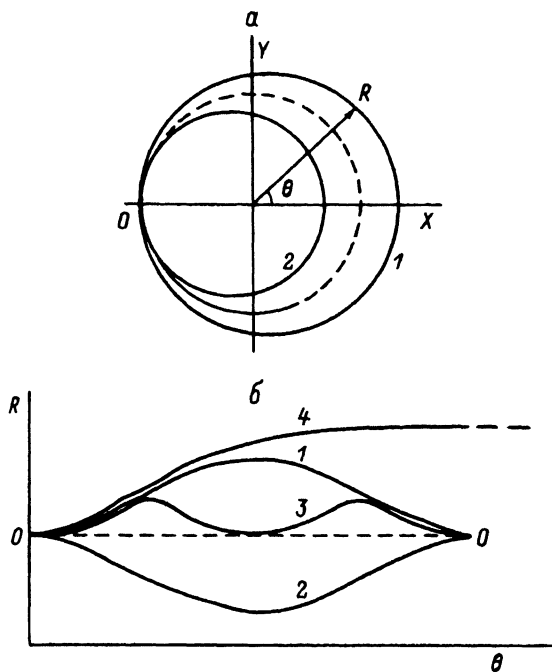


Рис. 1. Траектории электронов в группирователе в различных координатах. а — координаты X, Y ; б — координаты R, θ . 1, 2 — траектории, по которым должны двигаться электроны при правильно выбранном значении индукции фокусирующего поля; 3, 4 — траектории при большем и меньшем соответственно значении индукции.

от оси, снова подошли к ней через $\theta = 360^\circ$ (рис. 1), т.е. нужно, чтобы длина волны колебаний равнялась длине петли группирователя (в нашем случае $\lambda = 3.14$ м).

Частицы с энергиями $E \pm \Delta E$ могут иметь такие траектории только при определенном значении магнитного фокусирующего поля, так как длина волны колебаний однозначно связана с энергией электронов и величиной индукции [6]

$$\lambda[\text{м}] = 4\pi mc\beta\gamma/qB_2^{\text{max}} = 213\sqrt{\gamma^2 - 1}/B_2^{\text{max}}[\text{Т}].$$

Здесь B_2^{max} — максимальное значение синусоидального фокусирующего поля.

Таким образом, длина витка группирователя определяет величину фокусирующего поля, если задана энергия электронов. При отклонении величины индукции от требуемого значения электроны будут совершать колебания относительно оси симметрии с меньшей длиной волны при большом поле (кривая 3) либо с большей длиной волны при меньшем значении индукции (кривая 4).

Теперь можно из условия согласования пучка с магнитным каналом определить оптимальную величину транспортируемого тока [6]. Кроме индукции сопровождающего магнитного поля она будет зависеть еще от радиуса пучка. В табл. 1 приведены вычисленные значения тока для нескольких радиусов для различных энергий (при нулевом эмиттансе). Из

Таблица 1. Максимальные значения магнитной индукции фокусирующего поля для группирователя с радиусом поворота 0.5 м и тока группируемого пучка при различных радиусах пучка

W, МэВ	B, T	I, A		
		$r = 0.25 \cdot 10^{-2}$ м	$r = 0.5 \cdot 10^{-2}$ м	$r = 1.0 \cdot 10^{-2}$ м
1.0	0,019	2	9	36
2.0	0.032	12	46	188
5.0	0.073	132	524	2094

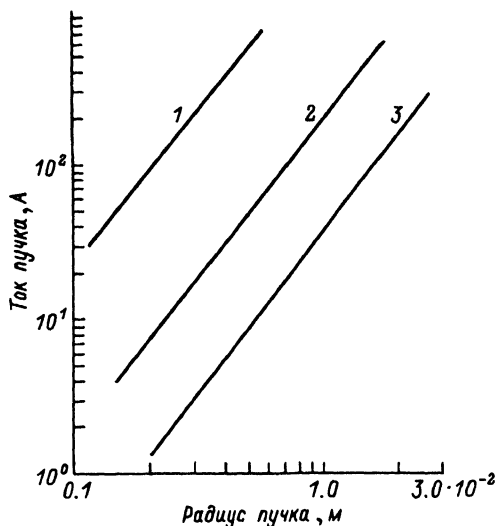


Рис. 2. Зависимость величины группируемого тока от радиуса пучка на входе в группирователь.
W, МэВ: 1 — 5, 2 — 2, 3 — 1.

Таблица 2. Значения индукции магнитного фокусирующего поля и группируемого тока для пучка с радиусом $r = 0.5 \cdot 10^{-2}$ м, вычисленные при различных эмиттансах

W, МэВ	$\epsilon = 0.18 \cdot 10^{-4}$ м·рад		$\epsilon = 0.25 \cdot 10^{-4}$ м·рад		$\epsilon = 0.3 \cdot 10^{-4}$ м·рад		$\epsilon = 0.35 \cdot 10^{-4}$ м·рад	
	B, T	I, A	B, T	I, A	B, T	I, A	B, T	I, A
1	0.018	7	0.017	4	0.016	2	0,015	0.01
2	0.032	35	0.029	23	0.028	13	0.026	0.7
5	0.072	387	0.067	260	0.062	145	0.058	8

таблицы видно, что необходимая величина группируемого тока сильно изменяются с энергией электронов и радиусом пучка.

На рис. 2 показана зависимость необходимого тока от радиуса пучка для нескольких значений энергии электронов.

Преыдушие вычисления тока были сделаны без учета эмиттанса. Учет эмиттанса изменяет величины фокусирующих полей и токов. Так, при эмиттансе $\epsilon = 0.5$ м·рад. индукция магнитного поля изменяется на

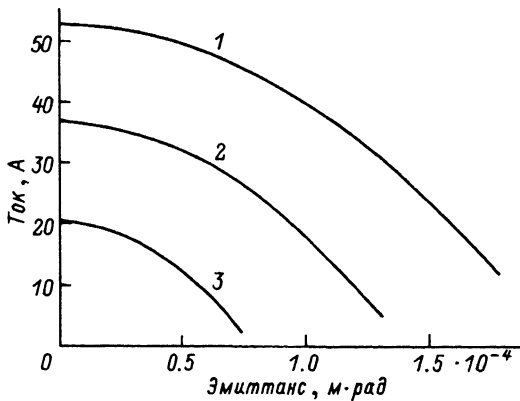


Рис. 3. Изменение величины группируемого тока от эмиттанса для энергии электронов $W = 1$ МэВ.

R , м: 1 — 0.012, 2 — 0.01, 3 — 0.0075.

~ 20%. Величины группируемого тока изменяются значительно (табл. 2). На рис. 3 показано, каким образом изменяются величины группируемого тока при энергии электронов $W = 1$ МэВ с учетом эмиттанса для различных радиусов пучка на входе группирувателя.

Таким образом, при заданных значениях энергии электронов и эмиттансе пучка величина индукции фокусирующего поля для группирувателя определяется однозначно радиусом поворотного магнита. После того, как определено значение индукции фокусирующего поля, можно из условия согласования пучка с магнитным каналом найти величины группируемого тока и диаметр подводимого к группирувателю электронного шнура.

Список литературы

- [1] Водопьянов Ф.А., Мурин В.П. // Тр. Радиотехнического института. М., 1975. № 22. С. 20–33.
- [2] Водопьянов Ф.А., Литвинов В.Н. // Тр. Радиотехнического института. М., 1975. № 22. С. 70–80.
- [3] Беневоленский Д.М., Требич В.Д. // РиЭ. 1985. Т. 30. № 12. С. 2442–2449.
- [4] Рогинский Л.А. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 4. С. 769–776.
- [5] Veal S.W., Cooper R.K., Lamb W.A. et al. // Trans. IEEE. 1973. Vol. NS-20. N 3. P. 347.
- [6] Лоусон Дж. // Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980. С. 3–438.

Институт энергетики
и автоматики
Ташкент

Поступило в Редакцию
8 января 1991 г.
В окончательной редакции
22 апреля 1992 г.