

# О РОЛИ НЕОДНОРОДНОСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА УЧАСТКАХ ЭЛЕКТРОННОГО ДРЕЙФА СЕКЦИОНИРОВАННЫХ ГИРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРИБОРОВ

*В. А. Жураховский, А. А. Кураев*

Киев, Минск

Кинематические процессы коллективного поведения электронов винтового потока в сосредоточенных активных зонах и на протяженных участках дрейфа многокаскадных модуляторов секционированных гирорезонансных приборов теоретически уже исследовались ранее. Были получены соотношения, позволяющие весьма просто учитывать влияние неоднородности направляющего магнитного поля на качество группирования винтового электронного пучка путем коррекции численных значений параметров группировки  $X$  с помощью поправочных множителей  $b$ , принимающих значение единицы в частном случае однородного поля. Воспроизведем здесь выражение для коэффициента  $b$  и исследуем его:

$$b = \int_0^1 \frac{1 - q^2 \varphi - \frac{\beta_{\parallel}^{-2} \varphi^2}{3}}{(1 - q^2 \varphi)^2} ds, \quad (1)$$

где  $s \in [0; 1]$  — безразмерная нормированная продольная координата на данном дрейфе;

$\varphi \equiv \left(\frac{B}{B_0}\right) - 1$ ,  $B$  и  $B_0$  — соответственно текущая и начальная индукция магнитного поля в той же пространственной области;

$q \equiv \frac{\beta_{\perp}}{\beta_{\parallel}}$ ,  $\beta_{\perp}$  и  $\beta_{\parallel}$  — отнесенная к скорости света соответственно поперечная и продольная невозмущенные скорости электрона.

Термины «поперечная» и «продольная» относятся к системе координат на силовой линии магнитного поля, с которой связана рассматриваемая нить винтового электронного потока.

В случае малой неоднородности направляющего магнитного поля и слаборелятивистского электронного пучка формула (1) существенно упрощается:

$$b \approx 1 + \frac{q^2}{2} \int_0^1 \varphi ds - \frac{1}{\beta_{\parallel}^2} \int_0^1 \varphi^2 ds. \quad (2)$$

Воспользуемся (2) для оценки влияния на работу секционированного гирприбора неоднородности сборки многокатушечного соленоида, выбирая в качестве модели поля простой закон

$$\varphi = a \sin \pi l s, \quad l \gg 1. \quad (3)$$

Пусть, например,  $a = 0,03$ ,  $\beta_{\parallel}^2 = 0,03$ . Тогда

$$b \approx 1 - \frac{a^2}{2\beta_{\parallel}^2} = 0,98, \quad (4)$$

что указывает на практическую нечувствительность прибора к частым вариациям магнитного поля на дрейфе с амплитудой в пределах нескольких процентов.

Иной возможный случай неоднородности — возрастание поля к средней части зоны дрейфа, который имеет место в соленоиде с равномерной намоткой без коррекции на концах. В качестве модели поля примем

$$\varphi = a \sin^2 \pi s. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (1) и выполняя интегрирование ([1], стр. 176 и 178), получаем

$$b = \frac{2}{\pi} \left[ \left( 1 + \frac{2}{q^4 \beta_{\parallel}^2} \right) K(\sqrt{q^2 a}) - \frac{1}{q^4 \beta_{\parallel}^2} \cdot \frac{2 - q^2 a}{1 - q^2 a} E(\sqrt{q^2 a}) \right], \quad (6)$$

где  $K$  и  $E$  — полные эллиптические интегралы от указанных аргументов. Следствия результата (6) графически показаны в виде семейства зависимостей на рис. 1, а. Пусть, например,  $a = 0,27$ ,  $\beta_{\parallel}^2 = 0,03$ ,  $q^2 = 3$ . Тогда имеем  $b \approx -5$ . Минус указывает на противофазность образующегося сгустка в противовес однородному полю. На конечные энергетические соотношения знак  $b$  в случае, например, однокаскадной модуляции влияния не оказывает; таким образом, при наличии области повышенного магнитного поля в средней части зоны дрейфа после однокаскадного модулятора удастся в несколько раз сократить общую длину. Следовательно, вес прибора, либо при необходимости понизить амплитуду модулирующего сигнала. Следует, однако, заметить, что требования к разбросу электронов по скоростям при этом становятся более жесткими, так как для группы частиц с малой продольной скоростью область повышенного поля может оказаться магнитной пробкой.

Основной причиной неоднородности характеристик электронов чаще всего является провисание потенциала по толщине пучка. Это явление сказывается главным образом на величине разброса продольных составляющих полной скорости. Максимально допустимый разброс оценивается

как  $\frac{\Delta \beta_{\parallel}}{\beta_{\parallel \text{ ср}}} = 1 - \frac{q_{\text{ср}}}{q_{\text{макс}}}$ . В рассмотренном выше числовом примере  $q_{\text{макс}}^2 = \frac{1}{a} = 3,7$  и  $\frac{\Delta \beta_{\parallel}}{\beta_{\parallel \text{ ср}}} \approx 10\%$ , что легко может быть реализовано. Следует

отметить, что вклад модуляции в разброс продольных скоростей электронов практически может не приниматься во внимание, по крайней мере при напряжениях до 40 кВ, так как это — эффект релятивистской поправки.

При малой неоднородности поля (6) дает ([1], стр. 919)

$$b \approx 1 + \frac{q^2 a}{4} - \frac{3}{8} \cdot \frac{a^2}{\beta_{\parallel}^2}, \quad (7)$$

т. е. при  $a = 0,03$ ,  $\beta_{\parallel}^2 = 0,03$ ,  $q^2 = 3$  имеем  $b \approx 1,01$ , что практически не отличается от единицы. Этот же результат можно было получить и с помощью формулы (2).

В случае перекомпенсации поля на краях соленоида с коррекцией может наблюдаться понижение индукции в средней части зоны дрейфа.

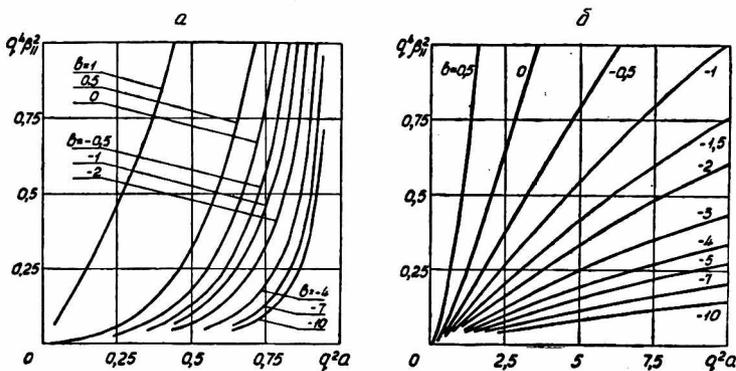
Выбирая в качестве модели такого поля

$$\varphi = -a \sin^2 \pi s, \quad (8)$$

получаем

$$b = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+q^2a}} \left[ \left( 1 + \frac{2}{q^4 \beta_{\parallel}^2} \right) K \left( \sqrt{\frac{q^2a}{1+q^2a}} \right) - \frac{2+q^2a}{q^4 \beta_{\parallel}^2} E \left( \sqrt{\frac{q^2a}{1+q^2a}} \right) \right]. \quad (9)$$

Следствия результата (9) графически показаны в виде семейства зависимостей на рисунке (позиция б). Можно заметить, что достижение больших по модулю значений  $b$  здесь осуществимо лишь при малой продольной скорости, что представляет интерес, по-видимому, только для приборов малой мощности.



Зависимость параметра скорости электронов от параметра неоднородности магнитного поля при различных значениях коэффициента неоднородности:

а — случай повышения поля в средней части участка дрейфа;  
б — случай понижения поля.

При слабой неоднородности поля (9) дает

$$b \approx 1 - \frac{q^2a}{4} - \frac{3}{8} \cdot \frac{a^2}{\beta_{\parallel}^2}, \quad (10)$$

т. е. при  $a = 0.03$ ,  $\beta_{\parallel}^2 = 0.03$ ,  $q^2 = 3$  имеем  $b \approx 0.97$ . Как и в ранее рассмотренных случаях, влияние неоднородности поля при его понижении в средней части зоны дрейфа в пределах нескольких процентов несущественно.

Данный результат показывает, что при разработке магнитной системы секционированного гироприбора с длинным дрейфом нет необходимости в особой точности изготовления соленоида в противоположность, например, однорезонаторному генератору (гиромонотрону) [2] с поливинтовым пучком электронов, магнитное поле в котором должно быть выдержано с точностью до долей процента (имеются, впрочем, сведения о возможности повышения к. п. д. гиромонотрона при помощи целенаправленного введения специального закона неоднородности).

Учет указанного выше фактора заметно удешевляет магнит секционированного прибора. Кроме того, при наличии качественной электронно-оптической системы можно отказаться в некоторых случаях и от специальных мер краевой компенсации для выравнивания поля, так как именно неоднородное поле с подъемом индукции в средней части участка дрейфа обеспечивает высокие характеристики секционированного гироприбора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. Физматгиз, 1962.
2. Г. Н. Рапопорт, В. А. Жураховский, С. В. Кошечая, Т. А. Грязнова. Расчеты к. п. д. и частотных характеристик циклотронных генераторов на гармониках гирочастоты. «Изв. вузов, Радиоэлектроника», 1967. 10, № 11.