

К. т. н. В. И. ЧАСНЫК

УДК 622.3.032.266

Украина, г. Киев, НИИ «Орион»  
E-mail: ndiorion@tsua.netДата поступления в редакцию  
024.02 2011 г.

## ФОКУСИРОВКА ИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В СПИРАЛЬНОЙ ЛБВ С МПФС С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ

*Показана возможность использования МПФС с несинусоидальным полем для фокусировки электронных потоков в высоковольтных ЛБВ при достаточных для практики уровнях токопрохождения пучка на коллектор ЛБВ*

Интерес разработчиков мощных спиральных ЛБВ к применению в них для фокусировки интенсивных электронных пучков магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) с несинусоидальным распределением магнитной индукции вызван тем, что ее использование позволяет не только фокусировать интенсивные электронные потоки в ЛБВ [1—6], но и значительно повысить устойчивость работы спиральной высоковольтной ЛБВ к самовозбуждению на обратной волне [7].

В [4] рассмотрены оптимальные условия согласования электронного пучка с магнитным полем МПФС, содержащим высшие гармонические составляющие магнитной индукции (3-я и 5-я гармоники), и приведены расчеты по влиянию отклонений параметров пучка и переходной области от оптимальных на величину пульсаций электронного пучка. Однако, несмотря на эти расчеты, при практическом использовании МПФС с несинусоидальным полем для фокусировки пучка в спиральной ЛБВ не удалось получить хорошее токопрохождение на коллектор при параметре магнитного поля  $\alpha \geq 1,0$ . В случае же когда  $\alpha > 1,25$ , токопрохождение не превышало 25% для рассмотренных распределений поля и периодов МПФС [3]. Отсутствие хорошего токопрохождения в высших областях устойчивого формирования электронного потока авторы объяснили сильным влиянием неоднородностей фокусирующей системы. Вместе с тем, известно, что при вводе пучка с радиальной составляющей скорости пульсации увеличиваются и значительно уменьшается устойчивость формирования при больших  $\alpha$ . Поэтому при работе в высших областях устойчивости согласованию электронной пушки с полем и обеспечению ламинарности пучка в пушке должно уделяться особое внимание [2].

В [2, 4] проведены теоретические расчеты по определению влияния величины индукции магнитного поля в первой магнитной линзе МПФС на токопрохождение [4] и на величину пульсации границы электронного пучка [2]. Эти расчеты показали существенное

влияние магнитной индукции в первой линзе МПФС как на прохождение, так и на контур электронного пучка во второй области устойчивости. Кроме того, в [4] подчеркивается, что устойчивость фокусировки при увеличении переходной области, как правило, возрастает, а это означает увеличение роли магнитного поля на входе МПФС в формировании пучка в переходной области.

В настоящей работе было экспериментально исследовано влияние величины магнитной индукции в первой линзе МПФС на токопрохождение интенсивных электронных пучков в спиральных ЛБВ с МПФС с несинусоидальным распределением магнитной индукции с периодами и уровнями фокусирующего магнитного поля, при которых  $\alpha > 1,0$ .

### Оптимальные значения амплитуд третьей и пятой гармоник осевого распределения магнитной индукции в МПФС с несинусоидальным полем

Как известно [1], первая область неустойчивой фокусировки электронного потока отсутствует при условии распределения магнитной индукции в виде

$$B_z(z) = B_{z1} \left( \cos \frac{2\pi}{L} z - 0,5 \cos \frac{6\pi}{L} z \right), \quad (1)$$

где  $L$  — период МПФС;

$B_{z1}$  — амплитуда первой гармоники поля.

Распределение магнитной индукции в соответствии с выражением (1) создается за счет шунтирующего кольца толщиной  $g_1$ , которое располагается в зазоре величиной  $g$  между полюсными наконечниками магнитной системы. Расчет МПФС, у которой внутренний диаметр шунтирующего кольца равен диаметру отверстия в полюсном наконечнике  $d$ , приведен в [8].

Типичное распределение продольной составляющей магнитной индукции на оси МПФС с несинусоидальным полем представлено на **рис. 1**, где показана величина магнитной индукции на входе МПФС ( $B_{z \text{ вх}}$ ), а также ее максимальное и минимальное значения ( $B_{z \text{ max}}$  и  $B_{z \text{ min}}$ ).

Как показывает гармонический анализ распределения магнитной индукции на оси таких систем, при выполнении условия  $B_{z3}/B_{z1} = 0,5$  в большинстве случаев в распределении магнитного поля присутствует отрицательная пятая гармоника довольно высокого уровня. Поэтому в данной работе рассматривались

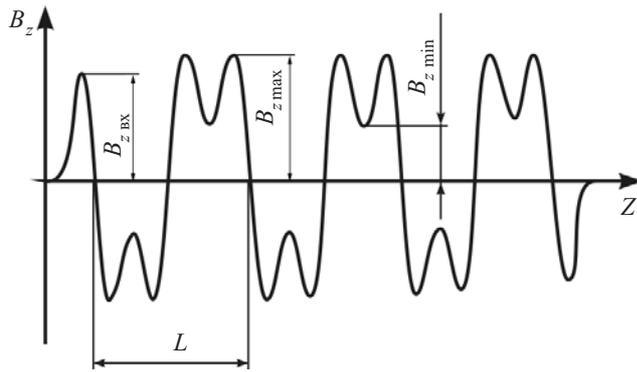


Рис. 1. Распределение магнитной индукции на оси МПФС с несинусоидальным полем

МПФС с несинусоидальным полем, у которых в распределении осевой компоненты магнитной индукции присутствует первая, третья и пятая гармоники поля:

$$B_z(z) = B_{z1} \left( \cos \frac{2\pi}{L} z - a_3 \cos \frac{6\pi}{L} z - a_5 \cos \frac{10\pi}{L} z \right), \quad (2)$$

где  $a_3 = B_{z3}/B_{z1}$ ;  $a_5 = B_{z5}/B_{z1}$  (здесь и далее  $a_i$  — относительная амплитуда  $i$ -й гармоники магнитного поля)

Спектр гармоник поля является одним из основных факторов, существенно влияющих на устойчивость интенсивных электронных потоков в поле МПФС [6]. При определенных соотношениях между третьей и пятой гармониками поля появляются дополнительные зоны неустойчивости, изменяются границы зон устойчивости и неустойчивости.

Известно, что первая область неустойчивости отсутствует, когда коэффициент  $\theta_2$  [5] равен нулю:

$$\theta_2 = \alpha(0,5 + a_3 + a_3 a_5 + a_5 a_7 + a_7 a_9). \quad (3)$$

Здесь параметр магнитного поля  $\alpha$  вычисляется по формуле

$$\alpha = 2,78 \cdot 10^8 L^2 B_{z1}^2 / U_0,$$

где  $U_0$  — ускоряющее напряжение.

Следует отметить, что при определении численных значений параметра  $\alpha$ , а также других, вычисляемых в статье, использовалась система СИ.

Уровень третьей гармоники определяется в основном длиной шунтирующего кольца  $g_1$ , а уровень пятой гармоники зависит от соотношения размеров  $d/L$  и  $g/L$ . С уменьшением зазора  $g$  между полюсными наконечниками, амплитуда отрицательной пятой гармоники возрастает особенно сильно в области значений  $d/L < 0,15$ . Так, например, при  $g_1/L = 0,145$  (обеспечивающем  $a_3 = -0,5$ ),  $d/L = 0,1$  и  $g/L = 0,3$  имеем  $a_5 = -0,57$ , т. е. уровень пятой гармоники больше, чем третьей. Соответственно увеличивается коэффициент  $\theta_2$ :  $\theta_2 = 0,254$  при  $\alpha = 1,0$ , что уже может оказать заметное влияние на границы зон устойчивости.

Уровни седьмой и девятой гармоник магнитного поля, рассчитанные в области значений  $g/L \geq 0,35$  и  $d/L > 0,15$ , на порядок меньше, чем уровни третьей и пятой гармоник. Поэтому произведениями  $a_5 a_7$  и  $a_7 a_9$  в выражении (3) можно пренебречь как величинами второго порядка малости. С учетом этого выражение для коэффициента  $\theta_2$  примет вид

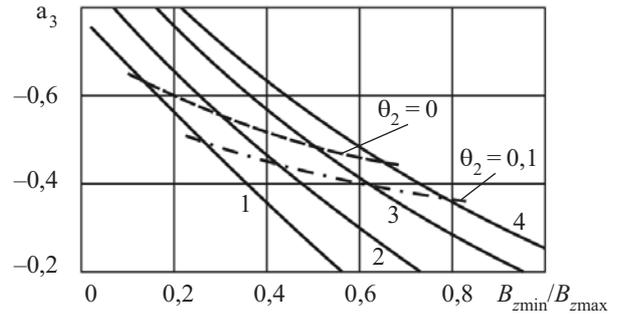


Рис. 2. Зависимость амплитуды третьей гармоники магнитной индукции от отношения  $B_{z\min}/B_{z\max}$  в МПФС с несинусоидальным полем для разных значений пятой гармоники:

1 —  $a_5 = -0,2$ ; 2 —  $a_5 = -0,1$ ; 3 —  $a_5 = 0$ ; 4 —  $a_5 = 0,1$

$$\theta_2 = \alpha(0,5 + a_3 + a_3 a_5). \quad (4)$$

Наилучшие условия фокусировки электронного потока (при которых отсутствует первая область неустойчивости) обеспечиваются при оптимальном значении  $\theta_2$ , равном 0. На рис. 2, где приведены зависимости  $a_3 = f(B_{z\min}/B_{z\max})$ , приведена также штриховая кривая, в каждой точке которой уровни третьей и пятой гармоник поля таковы, что  $\theta_2 = 0$  в соответствии с соотношением (4).

Анализ зависимостей, представленных на рис. 2, позволяет сделать следующий вывод: чтобы находиться в области устойчивой фокусировки электронного потока необходимо, чтобы с ростом амплитуды отрицательной пятой гармоники  $a_5$  от 0 до 0,2 соответственно возрастал и уровень отрицательной третьей гармоники  $a_3$  от 0,5 до 0,65. Следует отметить, что такая зависимость между амплитудами третьей и пятой гармоник магнитного поля сохраняется и при значениях коэффициента  $\theta_2$ , несколько отличающихся от оптимального, например когда  $\theta_2 = 0,1$  (штрихпунктирная кривая на рис. 2).

Таким образом, при наличии пятой гармоники поля, как положительной, так и отрицательной, расширяется диапазон возможных геометрических размеров полюсных наконечников и шунтирующих колец, при которых отсутствует первая область неустойчивости. Следует отметить, что этот диапазон максимален для МПФС с несинусоидальным полем, у которых  $g/L > 0,4$ . Так, например, для  $a_3 = -0,5$  и  $\alpha = 1,0$  при  $g/L = 0,45$  коэффициент  $\theta_2 = 0$  для любого значения отношения  $g/L$  в интервале от 0,01 до 0,38, а при  $g/L = 0,4$  коэффициент  $\theta_2 < 0,05$  в интервале  $0,15 < d/L < 0,35$ .

Однако при проектировании ЛБВ в целом не всегда возможно в МПФС с несинусоидальным полем выполнить условие  $g/L > 0,4$  по конструктивным соображениям, а при  $g/L < 0,35$  практически невозможно выбрать такие размеры шунтирующего кольца и полюсных наконечников МПФС, которые обеспечивали бы оптимальные условия устойчивости пучка. Поэтому при разработке МПФС с несинусоидальным полем представляет практический интерес определение возможных отклонений коэффициента  $\theta_2$  от оптимального, т. е. значения  $\theta_2 \neq 0$ , при которых можно сформировать мощный электронный пучок и получить приемлемое токопрохождение на коллектор ЛБВ. Рассмотрим пути решения этой задачи.

Таблица 1

Параметры исследуемых МПФС

№ п/п	$L$ , мм	$B_{z\text{вх}}$ , Тл	$B_{z1}$ , Тл	$-a_3$	$-a_5$	$E$	$\beta$
1	22,4	0,32	0,32	0,44	0,12	1,0	0,7
2	26	0,265	0,265	0,45	0,18	1,0	0,9
3	30	0,29	0,29	0,48	0,17	1,0	1,1

**Результаты экспериментального исследования**

Экспериментальное исследование токопрохождения в МПФС с несинусоидальным распределением магнитной индукции в статическом режиме работы проводилось на макете прибора и на мощных импульсных ЛБВ в динамическом режиме.

Одним из основных требований, предъявляемых к мощным импульсным ЛБВ, является наличие низковольтного управления электронным потоком. Поэтому при проведении эксперимента использовалась электронная пушка с сеточным управлением. Оптика электронной пушки приведена в [9, рис. 1]. Электронная пушка имела первеанс около  $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ А/В}^{3/2}$ , диаметр пучка на входе МПФС — 1,0 мм. Измерения проводились в импульсном режиме с длительностью импульса 10 мкс в вакууме  $(1-3) \cdot 10^{-7}$  Торр.

Макет прибора состоит из корпуса, в котором устанавливается электронная пушка, баллона из немагнитного материала и коллектора, расположенного на изоляторе в баллоне. Пролетный канал статического макета образуется набором медных втулок, размещенных внутри баллона. Длина пролетного канала составляет 100 мм при его диаметре 1,7 мм. МПФС, закрепленная в оправке, одевается на баллон макета без его разгерметизации и в процессе эксперимента может перемещаться вдоль оси макета. Такая конструкция макета и МПФС позволяла изменять расстояние от анода пушки до входа в МПФС, изменять амплитуду магнитной индукции в первой линзе МПФС, не меняя распределение магнитного поля в регулярной части МПФС. При фиксированном положении МПФС определялось управляющее напряжение на сетке электронной пушки, обеспечивающее наилучшее токопрохождение пучка на коллектор. Коэффициент токопрохождения определялся как

$$\chi = [I_{\text{кол}} / (I_{\text{кол}} + I_{\text{ос}})] \cdot 100\%$$

где  $I_{\text{кол}}$  — ток коллектора;  
 $I_{\text{ос}}$  — ток оседания в пролетном канале макета или спиральной ЛБВ с тем же диаметром пролетного канала (1,7 мм).

Для уменьшения краевых эффектов в рассматриваемой МПФС осевой размер крайних магнитов был выбран равным четвертой части периода. Концевые полюсные наконечники МПФС (первый и последний) размещаются в плоскостях симметрии, где индукция на оси пролетного канала минимальна ( $B_{z\text{мин}}$ ) или, по терминологии [2], находится в «провале» магнитного поля. Кроме того, концевые полюсные наконечники закорачиваются на экран, т. е. одновременно являются деталями экрана и магнитной системы. Все эти особенности рассматриваемой МПФС позволяют значительно уменьшить падение индукции на краях системы.

Параметры трех исследуемых МПФС приведены в табл. 1, где  $\beta = 3,84 \cdot 10^2 L^2 \cdot \Pi_{\text{п}} / r_{\text{вх}}^2$  — параметр пространственного заряда,  $\Pi_{\text{п}} = I_0 / U_0^{3/2}$  — первеанс,  $I_0$  — полный ток пучка. Указанные в таблице значения  $E$  получены из выражения  $E = (B_{z\text{вх}} / B_{z1})^2$ , такого же, как и в [2], для возможности сопоставления экспериментальных результатов, полученных в настоящей

работе, с теоретическими расчетами, выполненными в [2].

Из приведенных на рис. 3 экспериментальных зависимостей видно, что с уменьшением магнитного поля в первой линзе оптимум коэффициента токопрохождения смещается к большим значениям  $\alpha$ , которым соответствуют меньшие ускоряющие напряжения. Так,  $\chi > 85\%$  для  $E=0,64$  в интервале  $1,6 < \alpha < 1,95$  ( $U_0=10-12$  кВ). Кроме того, существует область значений параметра магнитного поля, в которой коэффициент токопрохождения слабо зависит от величины магнитной индукции в первой линзе МПФС. Так,  $\chi \geq 83\%$  при  $1,55 < \alpha < 1,65$  ( $U_0=11,8-12,5$  кВ) и любых  $E$  в интервале от 0,64 до 1,07.

На рис. 4 приведена зависимость максимального радиуса пучка  $\rho_{\text{max}}$  от параметра  $\alpha$ , построенная на основании данных [2, рис. 9, а]. Анализ зависимостей, приведенных на рис. 3 и 4, показывает, что ход экспериментальных кривых  $\chi = f(\alpha)$  для  $E=1,07$  и  $E=0,64$  довольно хорошо согласуется качественно с расчетными кривыми  $\rho_{\text{max}} = f(\alpha)$  для  $E=1,0$  и  $E=0,6$  во всем исследованном интервале  $\alpha$ . Так, например, при уменьшенном поле в первой линзе и  $\alpha > 1,6$  начинаются зоны наилучшего токопрохождения ( $\chi=86\%$ ) и наименьших пульсаций границы пучка. Также, в

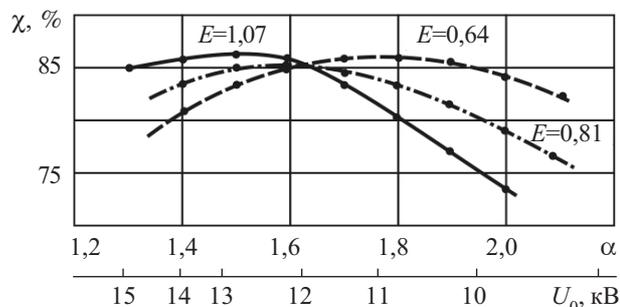


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $\chi$  от параметра  $\alpha$  для различных амплитуд  $E$  в первой линзе МПФС с периодом 30 мм при  $a_3 = -0,46$ ,  $a_5 = -0,19$ ,  $\beta = 1,1$

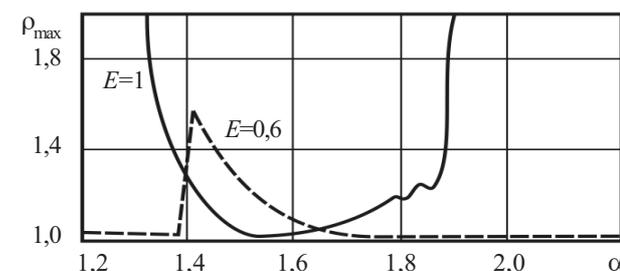


Рис. 4. Зависимость  $\rho_{\text{max}}$  от параметра  $\alpha$  для различных амплитуд  $E$  при  $a_3 = -0,45$ ,  $a_5 = 0$ ,  $\beta = 0,6$  (для случая ввода пучка в «провал» поля [2])

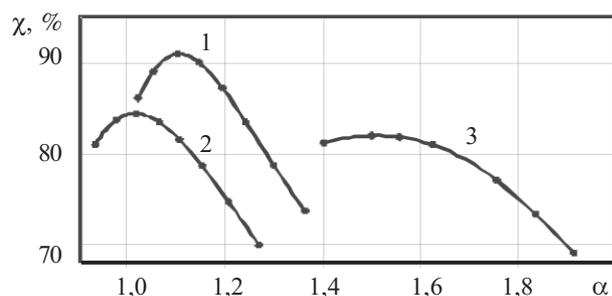


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $\chi$  от параметра  $\alpha$  для различных периодов МПФС (номера кривых соответствуют номерам МПФС в табл. 1):  
1 — 22,4 мм; 2 — 26 мм; 4 — 30 мм

интервале значений  $1,6 < \alpha < 1,7$  наблюдается наилучшее токопрохождение, а  $\rho_{\max} < 1,08$  для  $0,6 < E < 1,0$ .

Проведенные исследования показали, что улучшение согласования МПФС с электронной пушкой за счет изменения амплитуды магнитного поля в первой линзе магнитной системы и других параметров МПФС с периодом 30 мм привело к увеличению токопрохождения электронного пучка, которое максимально в диапазоне  $1,4 < \alpha < 1,6$  (рис. 5). Вместе с тем, следует заметить, что уменьшение поля в первой линзе целесообразно только в том случае, когда можно обеспечить запас по величине магнитной индукции [2].

В результате проведенных исследований по токопрохождению в статическом режиме макета МПФС с несинусоидальным полем были определены условия, обеспечивающие наилучшее согласование магнитной системы с электронной пушкой, экранированной от магнитного поля. С учетом этих исследований, с каждой МПФС были собраны и испытаны спиральные ЛБВ с током катода  $I_{\text{кат}} = 1,2—1,3$  А,  $U_0 = 12,0—14,0$  кВ, диаметром спирали 1,7 мм, длиной пролетного канала 95 мм.

Результаты измерений приведены в табл. 2. Амплитуда магнитного поля в первой линзе магнитного поля для всех трех МПФС равнялась амплитуде первой гармоники магнитной индукции.

Как и при статических испытаниях на макете прибора, самое высокое токопрохождение в динамическом режиме  $\chi = 87\%$  наблюдалось в ЛБВ с МПФС с периодом 22,4 мм при величине параметра магнитного поля  $\alpha \approx 1,1$ . Из анализа результатов токопрохождения в ЛБВ с периодами МПФС 26 и 30 мм можно сделать вывод, что при практически одинаковых уровнях третьей и пятой гармоник и близкими значениями коэффициента  $\theta_2$  фокусировка интенсивных элек-

тронных потоков во второй полосе устойчивости ( $\alpha > 1,4$ ) более чувствительна к отклонениям условий от оптимальных, чем в первой полосе устойчивости (при  $\alpha < 1,2$ ).

\*\*\*

Таким образом, экспериментально установлено, что при использовании электронной пушки с сеткой для формирования электронного пучка в спиральной ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем при  $1,0 < \alpha < 1,2$  коэффициент токопрохождения в статическом режиме работы ЛБВ составляет 85—91% и 78—85% в динамическом, а при значениях  $\alpha > 1,4$ , соответствующих второй области устойчивости, коэффициент токопрохождения достигает 82% в статике и 75% в динамике.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность использования МПФС с несинусоидальным полем для фокусировки электронных потоков в высоковольтных ЛБВ при достаточных для практики уровнях токопрохождения пучка на коллектор ЛБВ.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Данович И. А. Анализ фокусировки и устойчивости интенсивных пучков в периодических магнитных полях // Изв. вузов. Радиофизика.— 1966.— № 2.— С. 351—361. [Danovich I. A. // Izv. vuzov. Radiofizika. 1966. N 2. P. 351]
2. Данович И. А., Кожушный В. А. Особенности формирования электронных потоков периодическими магнитными полями в неоптимальных режимах // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника.— 1971.— Т. XIV, № 9.— С. 1085—1094. [Danovich I. A., Kozhushnyi V. A. // Izvestiya vuzov SSSR. Radioelektronika. 1971. Vol. XIV, N 9. P. 1085]
3. Бахрах Л. Э., Мурзин В. В., Беляев В. К. Исследование фокусировки электронных пучков МПФС с негармоническим распределением поля // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.— 1978.— Вып. 10.— С. 39—46. [Bakhrakh L. E., Murzin V. V., Belyaev V. K. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1978. Iss. 10. P. 39]
4. Бахрах Л. Э., Газукин В. А., Мурзин В. В. Формирование электронных пучков в переходной области МПФС с негармоническим распределением поля // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.— 1978.— Вып. 11.— С. 60—66. [Bakhrakh L. E., Gazukin V. A., Murzin V. V. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1978. Iss. 11. P. 60]
5. Данович И. А. Формирование электронных потоков периодическими магнитными полями с несинусоидальным осевым законом распределения индукции. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.— 1966.— Вып. 9.— С. 20—29. [Danovich I. A. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1966. Iss. 9. P. 20]
6. Голеницкий И. И. Устойчивость интенсивных электронных потоков в МПФС с несинусоидальным распределением магнитного поля. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.— 1990.— Вып. 5.— С. 38—43. [Golenitskii I. I. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 1. Elektronika SVCh. 1990. Iss. 5. P. 38]
7. Часнык В. И. Устойчивость к самовозбуждению на обратной волне спиральной ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем // Техника и приборы СВЧ.— 2009.— № 2.— С. 3—7. [Chasnyk V. I. // Tekhnika i pribory SVCh. 2009. N 2. P. 3]
8. Данович И. А., Митус А. Ф. Расчет и моделирование периодических магнитных систем приборов СВЧ // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника.— 1972.— Т. XV, № 8.— С. 969—976. [Danovich I. A., Mitus A. F. // Izvestiya vuzov SSSR. Radioelektronika. 1972. Vol. XV, N 8. P. 969]
9. Ищенко А. И., Лось В. С., Паничевский В. А., Часнык В. И. Разработка ЭОС с высокой компрессией и низковольтным управлением электронным потоком // Тез. докл. ... «Периодическая, электростатическая и магнитная фокусировка электронных пучков».— М.: ЦНИИ «Электроника», 1973. Сер. 1. Электроника СВЧ.— Вып. 1 (13).— С. 37—39. [Ishchenko A. I., Los' V. S., Panichevskii V. A., Chasnyk V. I. // Tez. dokl. ... «Periodicheskaya, elektrostatischekaya i magnitnaya fokusirovka elektronnykh puchkov». Ser. 1. Elektronika SVCh. Moscow. TsNII «Elektronika», 1973. Iss. 1 (13). P. 37]

Таблица 2

Величина токопрохождения в ЛБВ с МПФС с несинусоидальным полем в статическом и динамическом режимах

№ п/п	L, мм	$\theta_2$	Статический режим			Динамический режим
			$\alpha$	$U_0$ , кВ	$\chi$ , %	$\chi_d$ , %
1	22,4	0,12	1,1	12,8	91	87
2	26	0,14	1,05	12,8	85	78
3	30	0,15	1,53	13,8	82	75