

## Фокусировка электронного пучка полигармоническим магнитным полем в режиме большого сигнала

*Представлены результаты численного анализа характеристик 3-х ЛБВ с различными значениями микропереванса и радиуса пролетного канала, как в статическом режиме, так и в режиме большого сигнала при фокусировке периодическим магнитным полем со сложным гармоническим составом. Проанализированы области устойчивости. Показано, что применение таких полей может уменьшить токооседание электронного потока.*

**Ключевые слова:** МПФС, полигармонические магнитные поля, статический и динамический режим

В технике СВЧ широко используются различные методы фокусировки электронных пучков магнитными полями (МП) [1]. Наиболее распространенным из них является использование однородного МП. Другим методом транспортировки протяженных пучков оказывается применение периодических фокусирующих систем (МПФС), в том числе полигармонических.

Поведение пучков в МПФС значительно сложнее, чем в системах с однородным полем. Особенностью подобных систем формирования является возникновение пульсаций в пучке и появление при определенных условиях резонансных явлений, приводящих к нарушению токопрохождения, и проявлению зон устойчивости (зоны токопрохождения) и зон неустойчивости (зоны запираания). Границы областей устойчивости и неустойчивости определены во многих работах [2-4].

Количественной оценкой степени устойчивости пучка служит параметр магнитного поля  $\alpha$ , характеризующий частотные свойства пучка как колебательной системы:

$$\alpha = \frac{\omega_l^2}{\omega^2} = 0.278 \frac{(BL)^2}{U_a},$$

где  $\omega_l$  – ларморова частота и частота периодических возмущений, Гц;  $B$  – индукция МП, Тл;  $L$  – период МП;  $U_a$  – потенциал анода, кВ.

На рис. 1 представлены рассчитанные по аналитической модели [5] границы первой зоны неустойчивости в полигармонических МП при разном количестве высших гармоник.

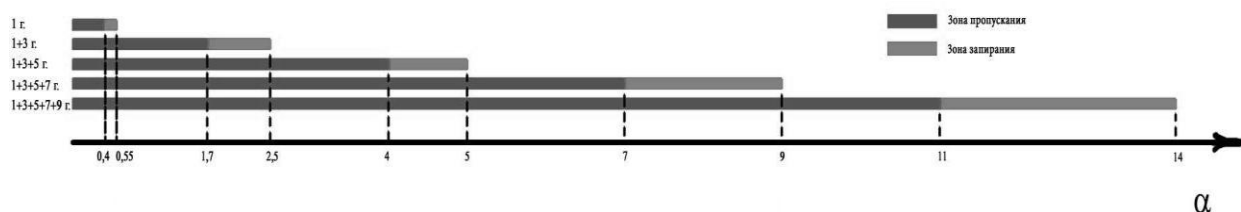


Рис. 1.

На практике в технике, как правило, используется первая зона устойчивости, хотя это приводит ограничению мощности подводимого пучка и повышенным пульсациям его

при приближении к границе зоны, что ухудшает токопрохождение в узких каналах и затрудняет ввод в область коллектора.

Для расширения областей устойчивости используют полигармонические МП с различными наборами амплитуд гармонических составляющих. В частности в [5] предложен способ выбора соответствующих амплитуд гармоник МП от 1-й до 9-й включительно, исходя из требования обнуления возмущающих сил, действующих на пучок. Однако, использованная в [5] аналитическая модель весьма идеализирована: пучки предполагаются параксиальными, плотность тока распределена по сечению равномерно, все электроны имеют постоянную осевую скорость, траектории всех электронов считаются подобными, не учитывается влияние СВЧ полей и колебаний электронов. Целью данной работы является исследование поведения электронного пучка в полигармоническом МП в режиме большого сигнала. Для этого используется двумерная программа, основанная на методе крупных частиц, с учетом реальных распределений плотностей и скоростей и влияния ВЧ полей на пучок. Для численного эксперимента были выбраны 3 прибора с различными микропервеансами и радиусами пролетного канала. В каждой лампе применялись МПФС с разным числом гармоник, но с неизменной среднеквадратичной величиной поля. Характеристики приборов приведены в таблице.

Номер прибора	Микропервеанс $\rho_{\mu}$ , мкА/В <sup>3/2</sup>	Потенциал анода $U_{a2}$ , кВ	Длина ЗС Z, мм	Радиус пролетного канала R, мм
1	0,446	8,9	164	1
2	0,703	18	285	2
3	1,287	12,5	648	5

На рис. 2–4 кривые представляют области токопрохождения в статическом режиме в зависимости от периода МПФС (там, где заканчиваются кривые, начинаются зоны неустойчивости) для 1–3 прибора соответственно, для различных комбинаций высших гармоник МП. Амплитуды гармоник выбирались согласно [5]. Закрашенные области представляют области неустойчивости, следующие из аналитической модели.

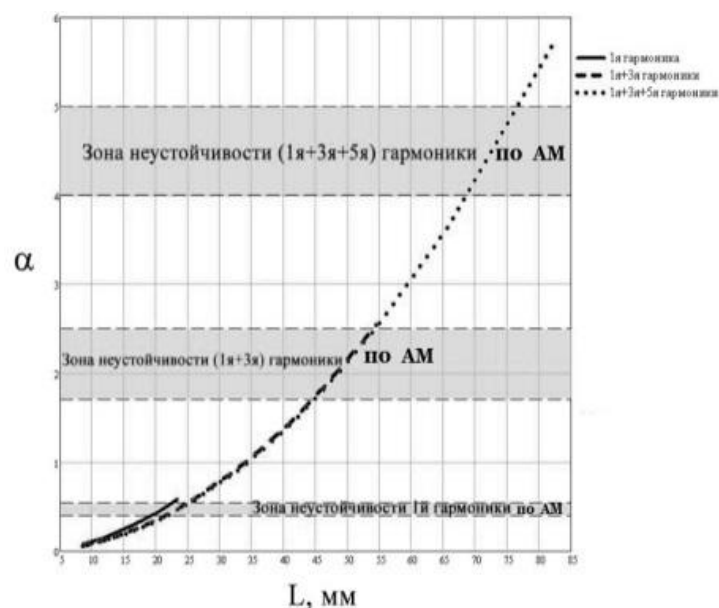


Рис. 2. Области токопрохождения в статике для прибора 1

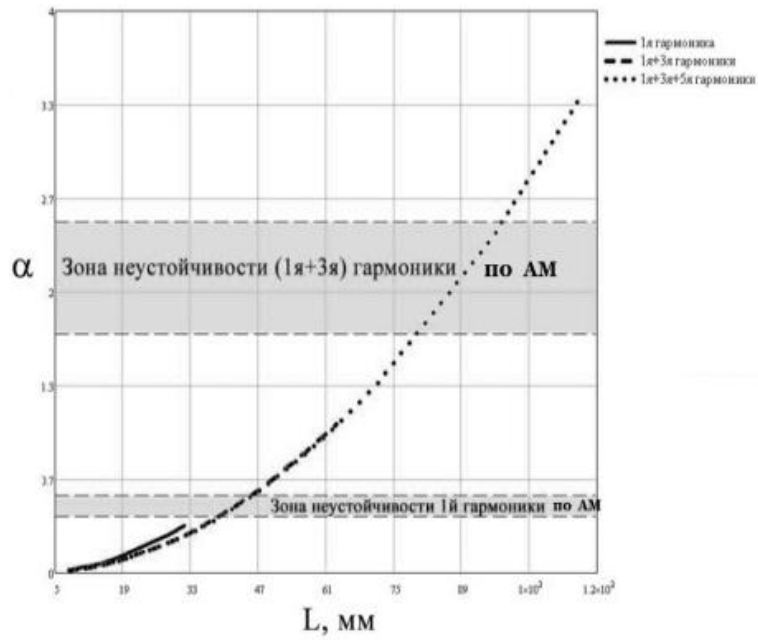


Рис.3. Области токопрохождения в статике для прибора 2

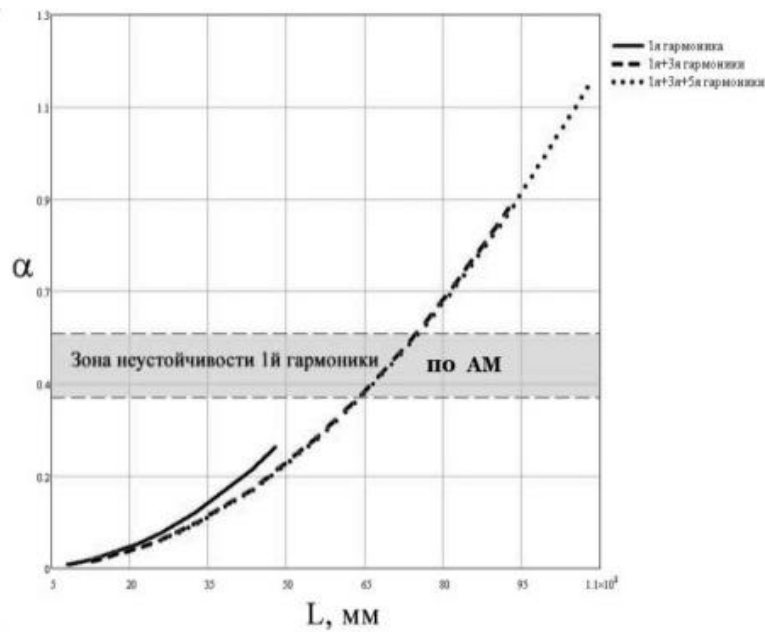


Рис.4. Области токопрохождения в статике для прибора 3

Видно, что, как правило, более реалистичная модель дает сужение области устойчивости: для приборов с высоким первансом (2 и 3) первая область токопрохождения уже, чем зона устойчивости, следующая из аналитической модели. Для прибора 1 она шире, что можно объяснить малой длиной лампы, на которой неустойчивость не успевает развиваться.

На рис. 5–7 представлена зависимость параметра  $\alpha$  от периода МП для 1–3 прибора соответственно в динамическом режиме.

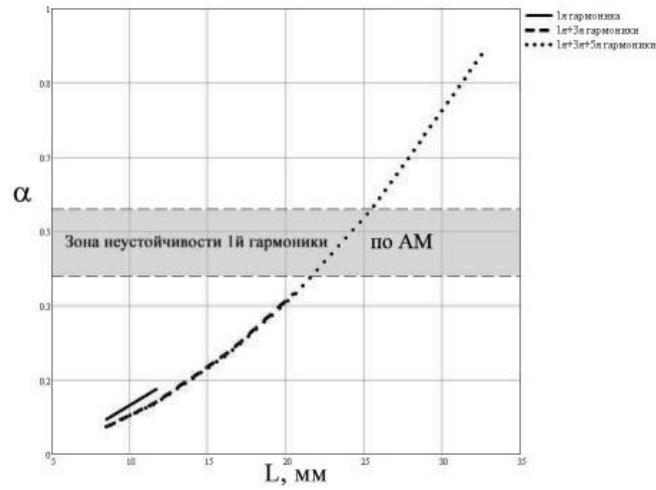


Рис.5. Области токопрохождения в динамике для прибора 1

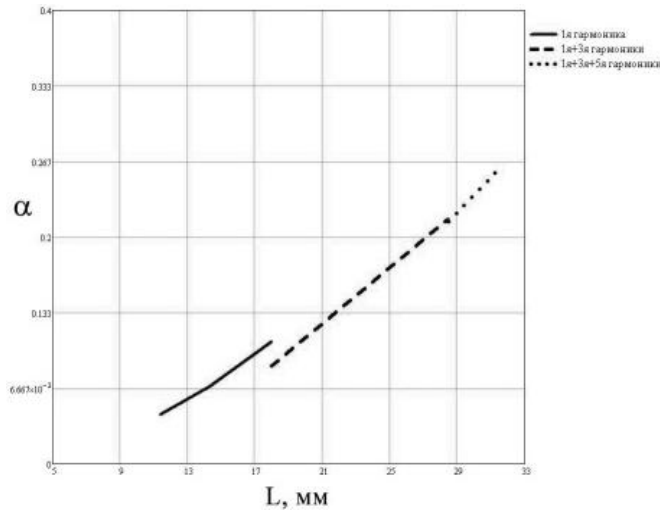


Рис.6. Области токопрохождения в динамике для прибора 2

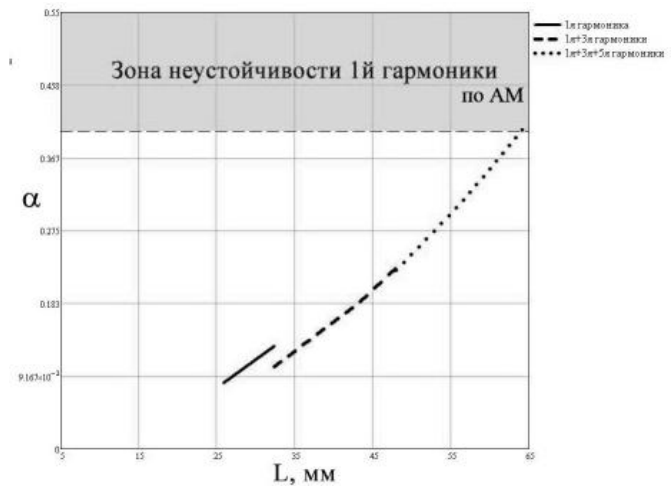


Рис.7. Области токопрохождения в динамике для прибора 3

Взаимодействие ВЧ поля с интенсивным электронным потоком сужает первую зону устойчивых решений для всех комбинаций высших гармоник МП. Для прибора 1 при

введении высших гармоник МП первая зона устойчивости расширяется (рис. 5), а для приборов 2, 3 – зона устойчивости сдвигается в область больших периодов (рис. 6,7).

По видимому эти результаты можно обобщить и сделать выводы, что для ламп со значениями микропервеанса меньше  $0,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$  введение высших гармоник МП расширяет область устойчивости, т.е. обеспечивает хорошую фокусировку электронного пучка. А для ламп со значениями микропервеанса выше  $0,5 \text{ мкА/В}^{3/2}$  – высшие гармоники МП сдвигают область устойчивости в сторону больших  $\alpha$ , что нужно учитывать при разработке приборов. Это дает возможность использовать увеличенные периоды МП (и большие амплитуды полей) для транспорта повышенных токов пучка.

В динамическом режиме рассматривался траекторный анализ электронов в периодическом МП. На рис. 8 продемонстрирована возможность улучшения фокусировки за счет увеличения периода МС, ставшего возможным при использовании высших (1, 3 и 5) гармоник МП.

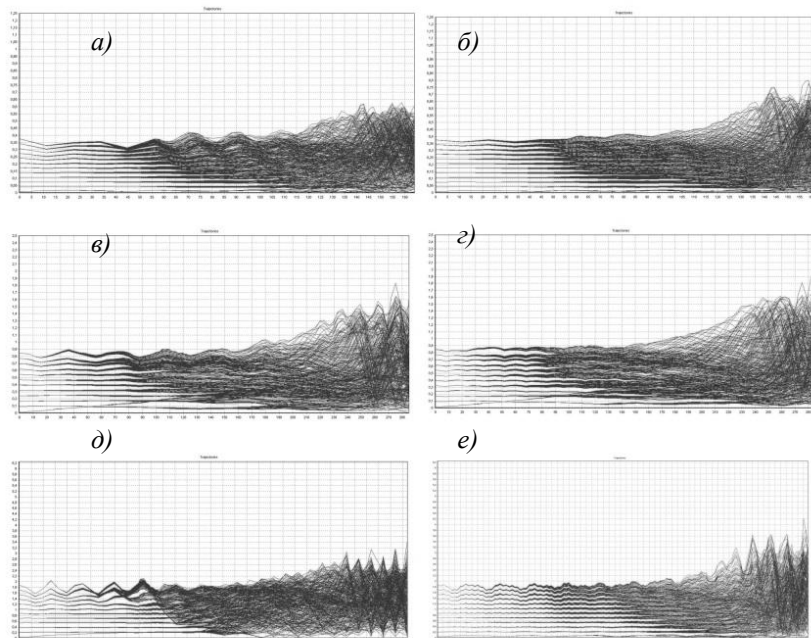


Рис.8.

Для прибора 1 представлена транспортировка электронного пучка в динамическом режиме: рис. 8а с периодом МС 8,5 мм (параметр  $\alpha$  равен 0,061), рис. 8б с периодом МС 16,4 мм (параметр  $\alpha = 0,227$ ). Для прибора 2 представлена транспортировка электронного пучка: рис. 8в с периодом МС 28,5 мм (параметр  $\alpha = 0,213$ ), рис. 8г с периодом МС 30 мм (параметр  $\alpha = 0,236$ ). Для прибора 3 представлена транспортировка электронного пучка: рис. 8д с периодом МС 32,4 мм (параметр  $\alpha = 0,104$ ), рис. 8е с периодом МС 60 мм (параметр  $\alpha = 0,351$ ). Для каждого прибора все представленные решения находятся в зоне устойчивости. Очевидно повышение ламинарности потока при увеличении периода.

Можно заключить, что получающиеся в рамках аналитической модели области устойчивости требуют корректировки при больших значениях  $\alpha$ , как для статического режима, так и, тем более, для динамического. Развал пучка при этих значениях  $\alpha$  является одной из причин ухудшения токопрохождения в динамическом режиме. Введение высших

гармоник магнитного поля позволяет применять большие периоды МПФС, что облегчает создание повышенных магнитных полей для фокусировки сильноточных низковольтных пучков (пульсации потока при этом также уменьшаются).

В зоне устойчивых решений для полигармонических МП существуют подобласти с хорошей ламинарностью пучка, где граница пучка имеет минимальные пульсации на большой протяженности, затем пучок расширяется из-за взаимодействия с ВЧ полем. Для приборов, использующих фокусировку пучка в МП с 1 и 3 гармониками, такая подобласть лежит в интервале значений  $\alpha$  0,15 - 0,17, для приборов с 1, 3 и 5 гармониками МП – в интервале 0,26 - 0,28.

#### Библиографический список

1. Кириштейн П.Т., Кайно Г.С., Уотерс У.Е. Формирование электронных пучков. Изд. «Мир», Москва, 1970, С. 250-312.
2. Данович И.А. Анализ фокусировки и устойчивости интенсивных электронных пучков в периодических магнитных полях. Изв. ВУЗов, «Радиофизика», 1966, 2.
3. Данович И.А. Формирование электронных потоков периодическими магнитными полями с несинусоидальным осевым законом распределения индукции // «Электронная техника», серия 1, «Электроника СВЧ». 1966. Вып.9. С.20.
4. Бахрах Л.Э., Мурзин В.В., Беляев В.К. Исследование фокусировки электронных пучков МПФС с негармоническим распределением поля // «Электроника СВЧ». 1978. Вып. 10. С.39.
5. Богацкая О.П., Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Макеев А.Э., Морев С.П. Транспортировка электронных потоков в мощных вакуумных приборах О-типа в магнитных полях со сложной периодической структурой поля // Материалы координационного научно-технического семинара по СВЧ технике, Нижний Новгород, 2011.