

Оценка влияния несоосности элементов магнитных периодических фокусирующих систем и пролетного канала лампы бегущей волны на уровень токопрохождения

И.О. Чигуров¹, М.В. Рахматулин^{1,2}, П.Д. Шалаев¹, Д.Л. Шалашова^{1,2}

¹АО «НПП «Алмаз»

²СГТУ им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: в работе представлены результаты трехмерного моделирования траекторий электронного потока в лампе бегущей волны Ка-диапазона частот. Показано влияние на уровень токопрохождения угловой, радиальной и комбинированной (угловой и радиальной) несоосностей магнитов магнитной периодической фокусирующей системы и пролетного канала в области влета в пространство взаимодействия (первые шесть магнитов фокусирующей системы). Установлено, что наибольшее влияние на траекторию электронного потока оказывает угловая и комбинированная несоосности.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, электронный поток, токопрохождение, магнитная периодическая фокусирующая система, поперечная составляющая магнитной индукции.

1. Введение

Современные тенденции развития ламп бегущей волны (ЛБВ) для бортовых ретрансляционных комплексов (БРК) космических аппаратов (КА) подразумевают переход к более высоким диапазонам частот. Это приводит к уменьшению радиуса пролетного канала и уменьшению поперечного сечения проводника, из которой изготовлена спираль замедляющей системы (ЗС). Вследствие этого возрастают сложность обеспечения высокого уровня токопрохождения и вероятность выхода изделия из строя в результате увеличения температуры спирали. Уровень токопрохождения показывает, какая доля электронов достигла коллектора и осталась в нем.

Одним из наиболее важных факторов, оказывающих дефокусирующее воздействие на электронный поток, является поперечная составляющая магнитной индукции (V_r). В современных приборах максимально допустимый уровень V_r составляет не более 1% от величины индукции магнитного поля в магнитной периодической фокусирующей системе (МПФС), а для приборов космического применения не более 0,3- 0,4%.

В процессе сборки ЛБВ с МПФС, в случае нарушения расстояния между полюсными наконечниками, приходится прибегать к уменьшению высоты магнита путем дополнительной шлифовки, которая может увеличить отклонение его размера по высоте. При этом, а также в случае наличия магнитной крошки между наконечниками, может появиться несоосность магнитов магнитной системы и пролетного канала. Наличие радиальной и/или угловой несоосностей оси магнита относительно оси пролетного канала приводит к значительному увеличению поперечной составляющей магнитной индукции. Это связано с тем, что часть продольной составляющей магнитной индукции становится поперечной относительно оси пролетного канала. [1]

После окончания фокусировки электронного потока и получения высокого уровня токопрохождения, проводят фиксацию положения магнитов и настроечных элементов

МПФС компаундом [2]. В процессе перехода компаунда в твёрдое состояние возникают «усадочные напряжения» [3], которые могут вызывать смещения магнитов и приводить к появлению дополнительных отклонений положения магнитов МПФС относительно оси пролетного канала.

Целью настоящей работы является качественная оценка влияния на уровень токопрохождения угловой, радиальной и комбинированной (угловой и радиальной) несоосностей магнитов магнитной периодической фокусирующей системы и пролетного канала в области влета в пространство взаимодействия (первые шесть магнитов фокусирующей системы) ЛБВ Ка-диапазона частот.

2. Компьютерное моделирование траектории заряженных частиц

В программе CST Particle Studio [4] было проведено моделирование траектории заряженных частиц в электро- и магнитостатических полях. Для проведения расчетов был применен метод декомпозиции, который позволил значительно уменьшить время расчета. Задача была разбита на две части: расчет электронной пушки и область влета в пространство взаимодействия (первые шесть магнитов фокусирующей системы) ЛБВ. Спиральная замедляющая система ЛБВ представлена в виде трубки, что позволяет значительно упростить построение сетки, уменьшить время расчета и не оказывает влияния на конечный результат.

Для экспорта данных о заряженных частицах из модели электронной пушки в модель области влета в пространство взаимодействия был применен Particle Interface, который расположен на поверхности пушечного фланца, обращенной в сторону катода.

На рисунках 1 – 2 представлены 3D-модели построенные в программе CST Particle Studio.

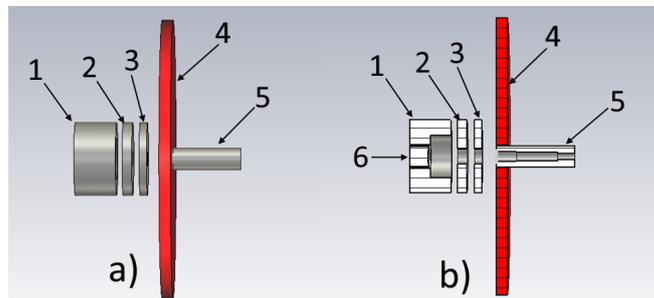


Рисунок 1. 3D-модель электронной пушки, построенная в программе CST Particle Studio (a); (b) – 3D-модель продольного сечения электронной пушки. 1 – управляющий электрод; 2 – анод 0; 3 – анод 1; 4 – пушечный фланец; 5 – коллиматор; 6 – катод.

Результаты расчета траекторий электронного потока в электронной пушке и в пролетном канале замедляющей системы представлены на рисунке 3. При этом, поперечная составляющая магнитной индукции при расчете траекторий электронного потока в пространстве взаимодействия не учитывалась.

Для получения более достоверных результатов в модель пространства взаимодействия были добавлены поперечные составляющие магнитной индукции величиной 1% от продольной составляющей. Направление поперечных составляющих выбрано таким образом, чтобы компенсировать друг друга для сохранения фокусировки электронного потока.

На рисунке 4 представлены траектории заряженных частиц в пролетном канале замедляющей системы с учетом поперечной составляющей магнитной индукции. Как видно из результатов, фокусировка электронного потока сохраняется.

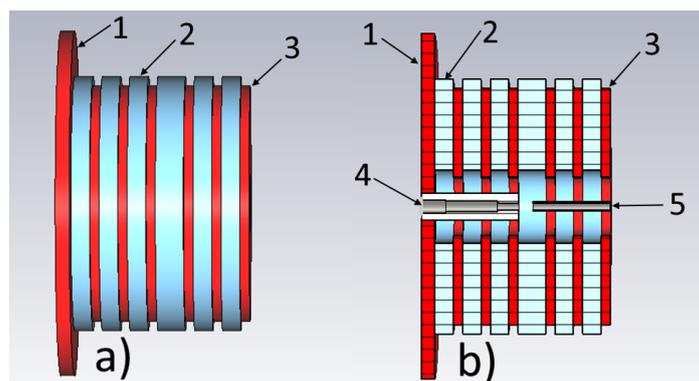


Рисунок 2. 3D-модель сегмента замедляющей системы с МПФС, построенная в программе CST Particle Studio (a); (b) – модель в сечении. 1 – пушечный фланец; 2 – кольцевой магнит МПФС (6 шт.); 3 – полюсный наконечник (6 шт.); 4 – коллиматор; 5 – модель замедляющей системы.

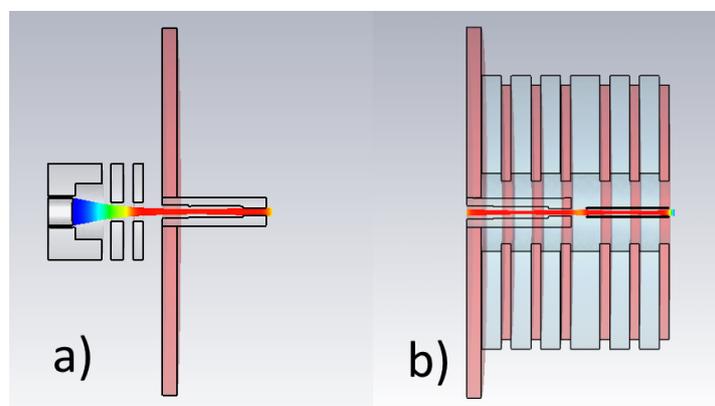


Рисунок 3. Результаты расчета траекторий электронного потока в электронной пушке (a) и пролётном канале замедляющей системы (b).

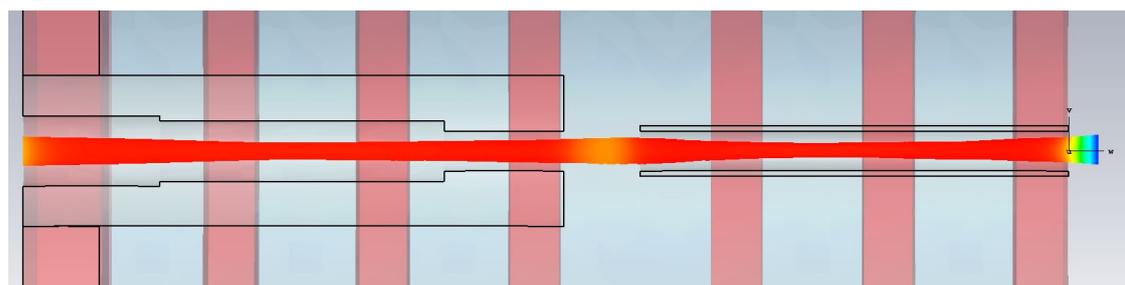


Рисунок 4. Результаты расчета траекторий электронного потока в пролётном канале замедляющей системы с учетом поперечной составляющей магнитной индукции.

Максимальный угол, на который может отклониться магнит между наконечниками составляет $0,44^\circ$. На рисунке 5 изображены результаты расчета траекторий заряженных частиц при наличии угловой несоосности. На рисунке 5 (a) представлен результат расчета траектории электронного потока при отклонении первого магнита на $0,44^\circ$. На рисунке 5 (b) представлены результаты расчета траектории электронного потока при отклонении первых двух магнитов в разные стороны на $0,44^\circ$.

Как видно из результатов расчета угловая несоосность вносит значительное дефокусирующее воздействие на электронный поток. Отклонение первых двух магнитов приводит к значительному токооседанию на спиральную замедляющую

систему, что может привести к выходу из строя лампы бегущей волны в результате расплавления спирали.

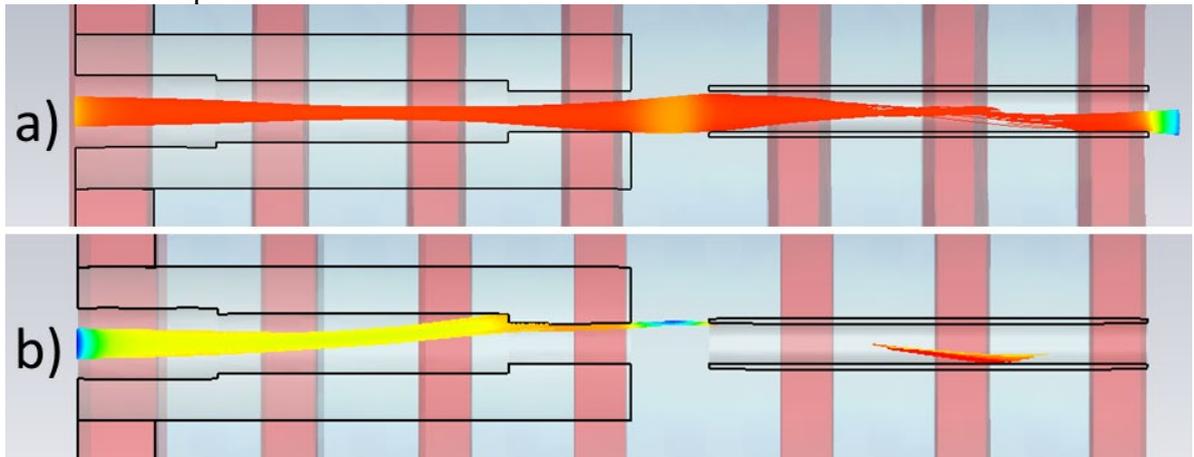


Рисунок 5. Результаты расчета траектории электронного потока в пролётном канале замедляющей системы с угловой несоосностью, при отклонении первого магнита на $0,44^\circ$ (a); при отклонении первых двух магнитов в разные стороны на $0,44^\circ$ (b).

Для исследования влияния радиальной несоосности внесем отклонение первого и второго магнитов на 0,02 мм. На рисунке 6 (a) представлен результат расчета траектории электронного потока при отклонении первого магнита. На рисунке 6 (b) представлены результаты расчета траектории электронного потока при отклонении первых двух магнитов в разные стороны.

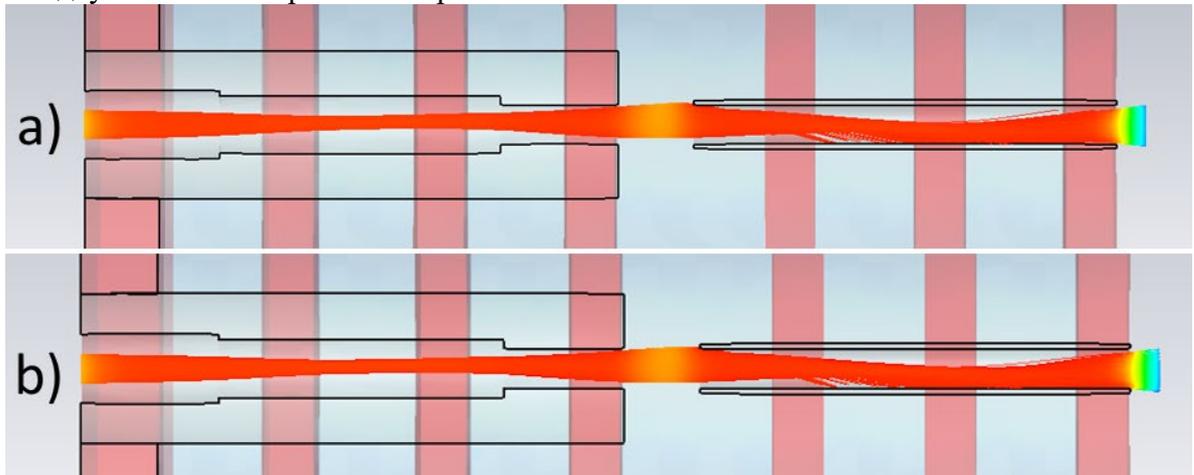


Рисунок 6. Результаты расчета траекторий электронного потока в пролётном канале замедляющей системы с радиальной несоосностью, при отклонении первого магнита на 0,02 мм (a); при отклонении первых двух магнитов в разные стороны на 0,02 мм (b).

Как видно из результатов расчета радиальная несоосность вносит дефокусирующее воздействие на электронный поток. При этом, уровень влияния ниже, чем при угловой несоосности. Однако отклонение первых двух магнитов также приводит к значительному токооседанию на спиральную замедляющую систему, что может привести к выходу из строя лампы бегущей волны в результате расплавления спирали.

Большой интерес также представляет исследование влияния комбинированной несоосности, которая сочетает в себе угловую и радиальную. На рисунке 7 представлены результаты расчета траектории электронного потока при угловой несоосности $0,44^\circ$ и радиальной несоосности 0,02 мм. на одном и двух магнитах.

Результаты расчета траекторий электронного потока при комбинированной

несоосности оси магнитов МПФС и оси пространства взаимодействия приводит к значительной дефокусировке электронного потока. При этом особо сильное воздействие возникает при несоосности более одного магнита.

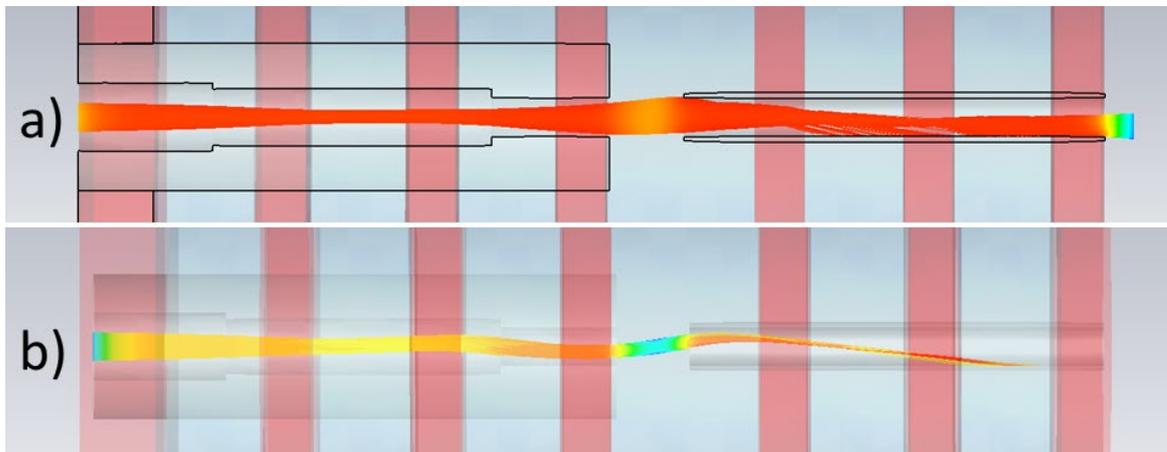


Рисунок 7. Результаты расчета траекторий электронного потока в пролётном канале замедляющей системы с комбинированной несоосностью, при отклонении первого магнита (а); при отклонении первых двух магнитов в разные стороны (b).

4. Заключение

Результаты расчета траекторий движения заряженных частиц в электро- и магнитостатических полях при угловой, радиальной и комбинированной несоосности показали, что наибольшую дефокусирующую силу имеет угловая несоосность оси магнита с осью пролётного канала замедляющей системы и ее комбинация с радиальной несоосностью. Даже незначительное отклонение оси магнита от оси пролетного канала на $0,44^\circ$ приводит к появлению высокого уровня токооседания на спиральную замедляющую систему, что может привести к выходу из строя лампы бегущей волны в результате повреждения спирали. Данная проблема решается корректировкой магнитного поля методом юстировки МПФС, но значительно усложняет процесс и повышает требования к уровню профессиональной квалификации исполнителя данной операции.

Предотвратить возникновение несоосностей магнитов МПФС и пролетного канала можно с помощью тщательного удаления магнитной крошки между полюсными наконечниками и введения дополнительного контроля магнитных параметров МПФС после дополнительной шлифовки магнитов.

Уменьшение уровня токопрохождения, возникающее в результате смещения магнитов при воздействии «усадочных напряжений» после фиксации положения МПФС компаундом, решается путем дополнительной юстировки.

Список литературы

1. Афонин И.Н., Кивокурцев А.Ю. Проблематика контроля поперечных составляющих магнитной индукции кольцевых магнитов малых размеров // 65 лет деятельности на рынке СВЧ-электроники: итоги и современные тенденции. Материалы юбилейной науч.-техн. Конф. АО «НПП «Алмаз». Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2022. С. 3-7.
2. Рахматулин М. В., Белова А. А., Бужинская Д. А. Особенности технологических процессов корректировки параметров магнитного поля в лампах бегущей волны миллиметрового диапазона длин волн юстировкой магнитной периодической фокусирующей системы на этапе предварительных динамических испытаний // Гагаринские чтения-2023. – 2023. – С. 400-401.
3. Галушко А. И. Внутренние напряжения в герметизирующих компаундах радиоэлектронной аппаратуры. – Советское радио, 1974.
4. Studio C. S. T. M. CST Studio Suite // Computer Simulation. – 2010.