

Влияние азимутальной дискретизации в секторной модели сильноточной электронной пушки

Н.К. Приступчик¹, И.В. Куликова¹, А.Н. Дармаев²

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина»

²АО «ЦСМ»

Аннотация: исследуется влияние азимутальной дискретизации в секторной конечно-элементной модели сильноточной электронной пушки. Выполнены расчёты при различных значениях азимутального охвата. Оценены параметры электростатического кроссовера, RMS-эмиттанс и характеристики начального ансамбля частиц. Показана необходимость контроля дискретизации сферической поверхности катода при смене порядка осевой симметрии.

Ключевые слова: электронная пушка; секторная конечно-элементная модель; траекторный анализ; азимутальная дискретизация; RMS-эмиттанс; электростатический кроссовер.

1. Введение

Трёхмерная секторная конечно-элементная модель аксиально-симметричной сильноточной электронной пушки представляет собой расчётную постановку, в которой анализ проводится не для полного объёма устройства, а для ограниченного азимутального сектора с периодическими граничными условиями.

Традиционно на ранних этапах проектирования аксиально-симметричных электронных пушек применяются двумерные модели, обеспечивающие относительно быстрый расчёт траекторий [1–4]. Однако при современной практике проектирования геометрия устройства формируется в трёхмерных САД-системах, и построение отдельной 2D-модели требует дополнительной параметризации и упрощений, не сокращающих трудоёмкость работы.

В условиях многовариантного проектирования определяющим становится не время одного расчёта, а время итерационного цикла «модификация конструкции – пересчёт – анализ». В этом отношении 3D секторная конечно-элементная модель с прямым редактированием геометрии оказывается технологически более удобной.

Кроме того, при проектировании многолучевых и многоэмиттерных пушек двумерная постановка теряет применимость, тогда как секторная 3D модель допускает естественное масштабирование конструкции.

Таким образом, возникает практическая задача оценки достоверности секторной 3D модели по сравнению с традиционным 2D-подходом, в частности — анализа влияния азимутальной дискретизации электронного потока.

2. От двумерных расчётов к секторным 3D моделям: предпосылки и ограничения

Численные методы расчёта электронно-оптических систем активно развивались с 1960-х годов. В отечественной школе были созданы специализированные программы для расчёта электронных пушек и аксиально-симметричных пучков, реализованные на ЭВМ БЭСМ-6 и М-220, включая комплексы, разработанные В. В. Пензяковым, И. И. Голеницким, С. П. Моревым и их коллегами. Эти работы заложили методическую основу инженерного проектирования электронных пушек в СВЧ-приборостроении.

Параллельно за рубежом развивались собственные расчётные инструменты,

наиболее известным из которых является программа EGUN (W. B. Herrmannsfeldt, SLAC), получившая широкое распространение в задачах электронной оптики.

Указанные подходы базировались преимущественно на двумерной аксиально-симметричной постановке задачи, что соответствовало вычислительным возможностям того времени и обеспечивало приемлемую скорость расчёта.

Однако широкое использование двумерной аксиально-симметричной постановки было обусловлено не только методическими соображениями, но и жёсткими ограничениями вычислительных ресурсов, а также трудоёмкостью подготовки трёхмерных геометрических моделей. Полные 3D расчёты либо не выполнялись, либо применялись в ограниченном объёме.

В современных условиях геометрия электронных пушек формируется непосредственно в трёхмерных CAD-системах, а многопоточные конечно-элементные расчёты стали стандартным инструментом инженерной практики. В этих условиях секторная трёхмерная модель с периодическими граничными условиями позволяет существенно снизить вычислительные затраты по сравнению с полной 3D постановкой, сохраняя при этом пространственную природу задачи.

Вместе с тем ограничение азимутального охвата приводит к дискретизации электронного потока по углу, что потенциально может влиять на формирование начального статистического ансамбля частиц и, как следствие, на результаты траекторного анализа.

3. Метод исследования

В рамках работы проводится серия вычислительных экспериментов с варьированием порядка осевой симметрии секторной модели, что соответствует изменению азимутального охвата $\Delta\varphi$.

Рассматривается диапазон от узкого сектора, близкого к двумерной аксиально-симметричной аппроксимации ($\Delta\varphi \approx 2^\circ$, порядок симметрии 180), до расширенных секторов с существенно меньшим порядком симметрии (вплоть до $\Delta\varphi \approx 90^\circ$, порядок симметрии 4), обеспечивающих выраженный трёхмерный характер дискретизации потока.

При каждом значении $\Delta\varphi$ выполняется траекторный анализ при фиксированной геометрии и граничных условиях. Число траекторий варьируется в диапазоне от $\sim 10^2$ до $\sim 10^3$, что позволяет оценить совместное влияние азимутального охвата и плотности дискретизации эмитирующей поверхности.

Для количественного сравнения результатов используются следующие параметры:

- продольное положение кроссовера z_c ,
- минимальный радиус пучка r_c ,
- RMS-нормированный поперечный эмиттанс,
- радиусы, содержащие фиксированную долю тока $\{r_{25}, r_{50}, r_{75}, r_{90}\}$,
- статистические параметры начального ансамбля частиц в прикатодной области.

Статистический анализ начального ансамбля включает расчёт моментов распределения координат и угловых скоростей частиц: $x' = v_x/v_z, y' = v_y/v_z$, а также RMS-эмиттанса вблизи эмитирующей поверхности.

Изменение азимутального охвата приводит к изменению дискретизации сферической поверхности катода и распределения стартовых точек. Поэтому проводится анализ статистической эквивалентности начальных ансамблей при различных $\Delta\varphi$, позволяющий убедиться, что смена порядка осевой симметрии не искажает исходную модель пушки.

4. Результаты и обсуждение

Предварительные вычислительные эксперименты выполнены для узкого сектора ($\Delta\varphi \approx 2^\circ$, порядок симметрии 180) и расширенного сектора ($\Delta\varphi \approx 10^\circ$, порядок симметрии 36). Сравнение результатов траекторного анализа показало наличие расхождений интегральных параметров пучка, включая положение и минимальный радиус электростатического кроссовера, а также RMS-нормированный поперечный эмиттанс.

В рассмотренных режимах относительное расхождение ключевых параметров не превышает 5 %, что может считаться приемлемым для практики проектирования сверхмощных релятивистских клистронов на этапе предварительной оптимизации.

Вместе с тем выявленная зависимость результатов от азимутального охвата указывает на необходимость контроля статистической структуры начального ансамбля частиц. Показано, что изменение порядка осевой симметрии приводит к изменению дискретизации сферической поверхности катода, что может влиять на формирование стартового ансамбля.

Полученные результаты подтверждают применимость секторной 3D модели при условии контроля дискретизации эмитирующей поверхности и обосновывают необходимость разработки количественного критерия эквивалентности секторных постановок при различных значениях $\Delta\varphi$ и числа траекторий.

Список литературы

1. Пензяков В. В. Расчёт электронных пушек на электронных цифровых машинах // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1966. № 1. С. 41.
2. Блейвас И. М., Голубцов Б. И., Ильин В. П., Попова Г. С., Свешников В. М. Комплекс программ для решения на БЭСМ-6 широкого класса задач статической электроники (компилирующая система КСИ-БЭСМ-6) // Доклады IV Всесоюзного семинара по методам решения задач электронной оптики / Тезисы. - Новосибирск: СО АН СССР, 1971, С. 26.
3. Голеницкий И. И., Захарова А. Н., Кушевская Т. П., Хомич В. Б., Шерер Л. А. Комплекс для расчёта на ЭВМ М-220 ЭОС от катода до коллектора на основе строгих и упрощённых математических моделей электронных пучков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1974, вып. 8, С. 109–110.
4. Журавлева В. Д., Морев С. П., Пензяков В. В., Роговин В. И. Программа расчета многоскоростного аксиально-симметричного пучка в магнитном поле // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1985. – Вып. 1. – С. 70.
5. Herrmannsfeldt W. Developments in the electron gun simulation program, EGUN // Engineering, Physics, Computer Science. – November 1994. – DOI:10.1063/1.48431