

Способ ускорения численных расчётов электронных пушек сверхмощных релятивистских клистронов

Н.К. Приступчик, И.В. Куликова

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: Рассмотрены особенности численного моделирования процессов формирования сильноточных релятивистских пучков на примере фрагмента электронно-оптической системы однолучевого сверхмощного релятивистского клистрона. Показано, что собственное магнитное поле пучка нельзя игнорировать, однако его учёт при стандартном способе моделирования электронных пушек приводит к катастрофическому росту затрат машинного времени. Предложен способ ускорения численных расчётов, сокращающий затраты машинного времени более чем на порядок.

Ключевые слова: Сверхмощные клистроны, электронная оптика, численное моделирование, оптимизация, сильноточные релятивистские пучки, самофокусировка электронных пучков

1. Введение

В настоящее время АО НПП «Исток» серийно выпускает сверхмощные клистроны (СМК) с выходной импульсной мощностью до 20 МВт, на базе однолучевых электронно-оптических систем (ЭОС) с сильноточными релятивистскими пучками [1]. Одной из областей применения СМК является ускорительная техника, где СМК используются как комплектующие [2].

Актуальность настоящей работы определяется тем, что удовлетворение растущих потребностей разработчиков ускорительной техники в новых СМК возможно только при постоянном улучшении производственных процессов, в том числе такого важного этапа жизненного цикла изделия, как предпроектная проработка.

Математическое моделирование ЭОС является неотъемлемой частью предпроектной проработки любого современного электровакуумного прибора, однако в случае СМК проектирование и оптимизация новой ЭОС существенно осложняется некоторыми особенностями математического моделирования физических процессов формирования сильноточных релятивистских пучков в электронных пушках (ЭП).

Проблема заключается в том, что на моделирование только одного варианта ЭП стандартным способом тратится чуть менее 15 часов машинного времени. Это означает, что оптимизационные расчёты, в ходе которых по результатам десятков вычислительных экспериментов определяется оптимальная конфигурация электродов ЭП могут растянуться на месяцы, что, разумеется, неприемлемо в условиях сжатых сроков проведения НИОКР. В данной работе предлагается способ ускорения численных расчётов ЭП, сокращающий затраты машинного времени более чем на порядок, тогда как ошибка в определении основных параметров электронного потока не превышает 0,5%, что является весьма хорошим результатом.

На рисунке 1 представлены результаты траекторного анализа фрагмента аксиально-симметричной ЭОС серийного СМК («эталонная модель» ЭП). Фрагмент включает ЭП и часть пролётного канала. Основные параметры электронного потока таковы: микропервеанс – $\mu P = 1,8 \frac{\text{мкА}}{\text{В}^{1,5}}$, положение кроссовера – $Z_{\text{кр}} = 130$ мм и радиус пучка в кроссовере – $R_{\text{кр}} = 11,33$ мм. Диаметр катода – 80 мм, диаметр пролётного канала – 30 мм. Общая протяжённость ЭОС от катода до коллектора составляет почти 1000 мм.

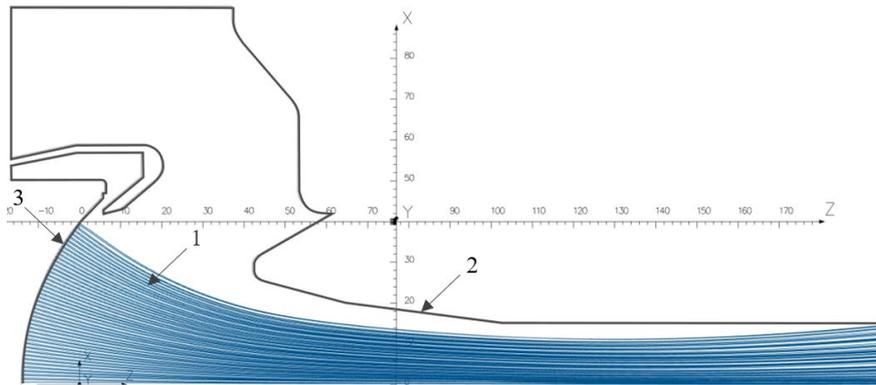


Рисунок 1. Результаты траекторного анализа в «эталонной модели»: 1 – сильноточный релятивистский пучок; 2 – контур электронной пушки; 3 – эмиссионная поверхность катода.

2. Собственное магнитное поле сильноточных релятивистских пучков

Каждую траекторию электронного пучка можно рассматривать как множество незамкнутых элементарных токов. На каждый такой элементарный ток, по закону Ампера, действуют магнитные поля, создаваемые всеми другими элементарными токами пучка и рассчитываемые по закону Био – Савара – Лапласа. Таким образом, пучок характеризуется некоторым «собственным» магнитным полем (СМП), которое определяется его током и обуславливает явление «самофокусировки». СМП является суперпозицией магнитных полей элементарных токов и стягивает пучок в поперечном направлении без дополнительного закручивания, что показано на рисунках 2 и 3.

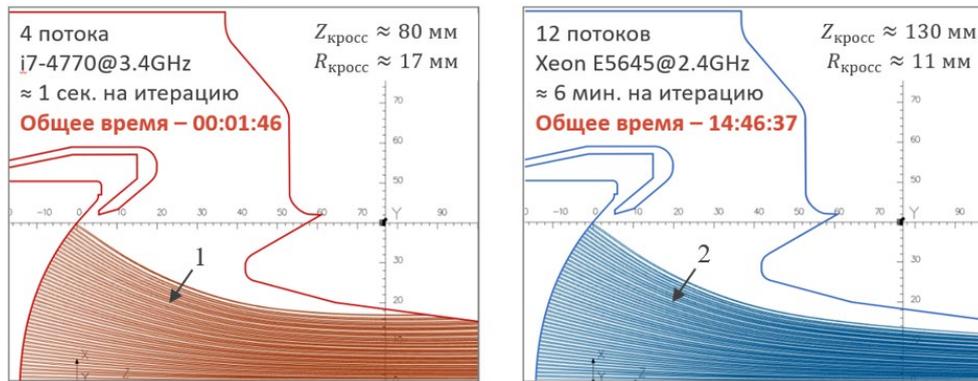


Рисунок 2. Сравнение результатов траекторного анализа в ЭП СМК: 1 – без учёта самофокусировки; 2 – с учётом самофокусировки.

На рисунке 3 показано, как СМП распределено в электронной пушке СМК, и как самофокусировка усиливается по мере компрессии пучка, проходящего через электростатическую линзу. Интересно, что по абсолютной величине максимальное значение СМП пучка не превышает 4% от амплитуды внешнего магнитного поля, создаваемого магнитной фокусирующей системой, построенной на базе многосекционного соленоида ($\max(B_z) < 1000$ Гс), однако этого достаточно для компенсации сил пространственного заряда и значительного сдвига кроссовера вправо (50 мм – это четверть длины всей эталонной модели).

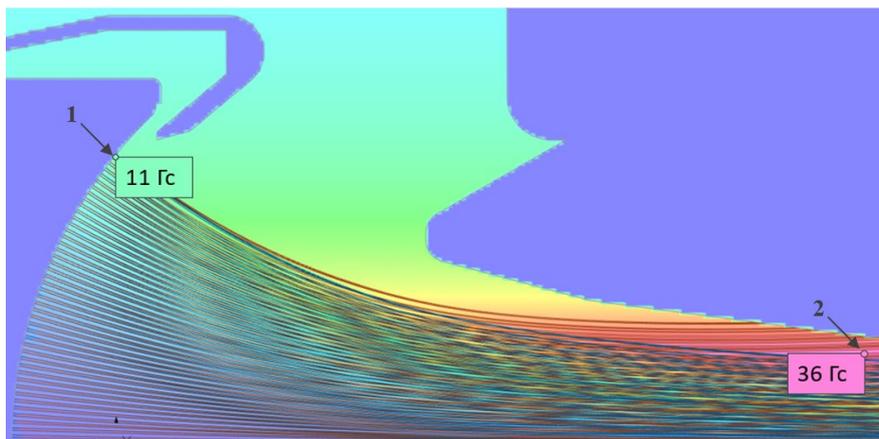


Рисунок 3. Сравнение результатов траекторного анализа в ЭП СМК: 1 – максимальная амплитуда СМП на катоде; 2 – максимальная амплитуда СМП в пролётном канале.

Здесь стоит отметить два момента. Во-первых, самофокусировка (за счёт СМП) качественно меняет характер пучка, поэтому проектировать ЭП СМК без учёта СМП нельзя. Во-вторых, как уже отмечалось во введении, на корректный расчёт всего одного варианта ЭП тратится почти 15 часов машинного времени, причём время, на подготовку расчётной модели на рабочей машине, и прочие «накладные расходы» (перенос задачи на удалённую высокопроизводительную машину и обратный перенос решения по локальной сети) не учитываются.

В практическом смысле это означает, что для повышения эффективности проектирования необходимо радикально сокращать затраты машинного времени, сохраняя при этом приемлемую точность определения основных параметров ЭП ($\mu P, Z_{кр}, R_{кр}$). Иными словами, необходимо найти способ построения «оптимизационной модели» ЭП, параметры которой не будут отклоняться от параметров «эталонной модели», показанной на рисунке 1, более чем на 5% (на практике такая точность считается приемлемой).

3. Расчёт ЭОС по частям и оптимизационная модель ЭП

На рисунке 4 схематически представлена декомпозиция «эталонной модели». Эта схема унифицирует имена отдельных частей ЭОС, что упрощает формальное описание методики расчёта протяжённых ЭОС, разделённых на n частей (пушка – P_1 , канал – $\{P_i | i = \overline{2,4}\}$, коллектор – $\{P_n | n > 4\}$).

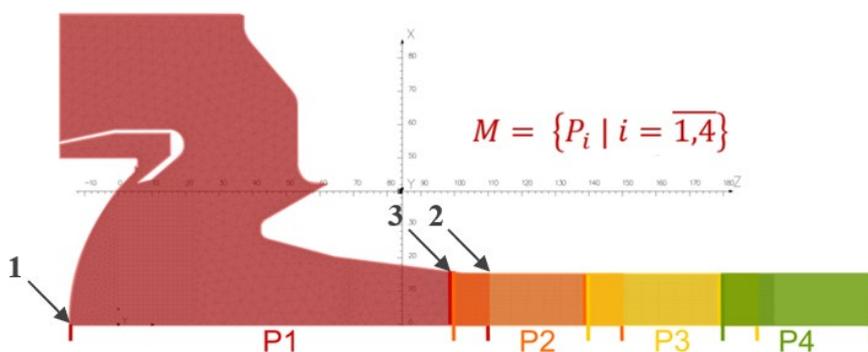


Рисунок 4. Декомпозиция фрагмента ЭОС для расчёта по частям: 1 – левая граница P_1 ; 2 – правая граница P_1 ; 3 – интерфейсная плоскость P_1/P_2 (левая граница P_2).

Известно, что в СМК катод работает в ρ -режиме, а следовательно, парциальные токи отдельных траекторий должны вычисляться в итерационном процессе самосогласованного решения двух сопряжённых задач: дифференциального уравнения Пуассона, описывающего распределение электростатических полей с помощью сеточного метода (например, метода конечных элементов), и системы из $3 \times N$ обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих движение заряженных частиц, где N – количество траекторий. Этот итерационный процесс можно называть уточнением начального состояния пучка (НСП). Фактически, НСП представляет собой таблицу из $N \times 7$ чисел, в которой для каждой траектории определены: ток, декартовы координаты точек старта и проекции вектора скорости на оси глобальной системы координат.

Начиная с P_2 , таблица НСП заполняется в ходе постобработки результатов траекторного анализа в P_{i-1} , где i – это порядковый номер части. Постобработка производится в интерфейсной плоскости (на рисунке 4 показаны двойными цветными линиями). Важно подчеркнуть, что уточняется НСП только в P_1 .

Практика расчётов показывает, что в P_1 релаксационный множитель, определяющий устойчивость итерационного процесса (уточнения НСП), $R_f \approx 0,05$. Чем ближе R_f к 1, тем устойчивее итерационный процесс, а следовательно, выше скорость его сходимости (на его завершение требуется меньше итераций).

При уточнении НСП в P_1 без учёта СМП плохая устойчивость компенсируется малыми временными затратами на одну итерацию, что было отражено на рисунке 2. На уточнение НСП затрачивается менее 2 минут машинного времени не самой производительной машины. Количество итераций $I \approx 10^2$.

К катастрофическому росту затрат машинного времени при уточнении НСП в P_1 с учётом СМП приводит то, что помимо расчёта пространственного заряда в тех ячейках конечно-элементной сетки, через которые проходят траектории, необходимо дополнительно рассчитывать суперпозицию магнитных полей, создаваемых всеми отрезками всех траекторий во всех ячейках сетки. Например, если для дискретизации P_1 используется $\approx 10^4$ конечных элементов, для дискретизации пучка $\approx 10^2$ траекторий, каждая из которых состоит из $\approx 10^3$ отрезков (элементарных токов), то **на каждой итерации уточнения НСП** дополнительно потребуется произвести $\approx 10^9$ вычислений СМП.

Очевидно, что, огрубляя эталонную модель (уменьшая количество траекторий в пучке и увеличивая линейный размер элементов сетки), можно добиться некоторого ускорения расчётов, однако, как показывают вычислительные эксперименты, сокращение затрат машинного времени всего в 2 раза (за счёт уменьшения протяжённости P_1) приводит к существенному (более 7%) снижению точности.

Предлагаемый нами способ ускорения расчётов основан на том, что временные затраты на уточнение НСП в P_1 без учёта СМП на 2 порядка меньше (≈ 500 раз) затрат на уточнение НСП с учётом СМП, но сами НСП практически не отличаются, что можно увидеть на рисунке 5.

Таким образом, если сначала уточнять НСП в эталонной модели P_1 без учёта СМП, табулировать его вблизи эмиттера, а затем использовать полученную таблицу НСП в модели P'_1 , отличающейся от P_1 тем, что при траекторном анализе СМП учитывается, а НСП не уточняется (как будто катод работает в Т-режиме), то можно сократить затраты машинного времени более, чем на порядок, тогда как ошибка определения основных параметров потока $Z_{кр}, R_{кр}$ не будет превышать 0,5%. Сопоставление результатов траекторного анализа, полученных в эталонной модели с результатами, полученными предложенным способом представлено на рисунке 6.

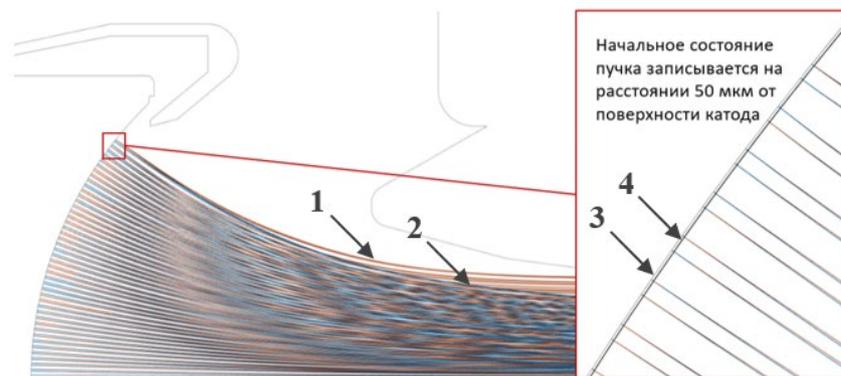


Рисунок 5. Влияние СМП на НСП в P_1 : 1 – пучок без учёта СМП; 2 – пучок с учётом СМП; 3 – эмиссионная поверхность катода; 4 – поверхность табулирования НСП.

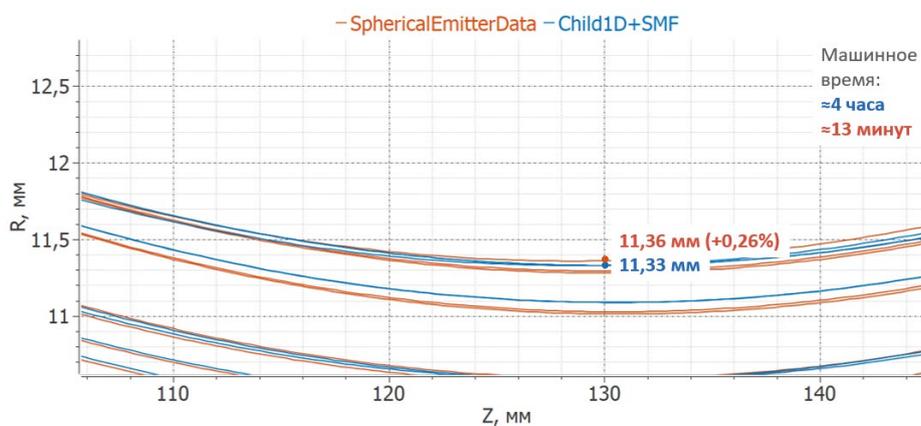


Рисунок 6. Сопоставление результатов траекторного анализа в эталонной и оптимизационной моделях: 1 – эталонная модель; 2 – оптимизационная модель

3. Заключение

В работе предложен эффективный способ ускорения электронно-оптических расчётов ЭП СМК. Ускорение составляет от 15 до 24 раз в зависимости от архитектуры и производительности вычислительной системы.

Предложенный способ отличается высокой точностью, что подтверждается результатами вычислительных экспериментов.

К недостаткам предложенного способа можно отнести сравнительно высокий «порог входа». Подготовка «ускоренного расчёта» осуществляется в несколько этапов. Первый – создание поверхности табулирования НСП в эталонной модели без учёта СМП и подготовка промежуточного файла. Второй – обработка промежуточного файла и формирование табличного представления НСП, пригодного для использования в оптимизационной модели. Третий – преобразование эталонной модели в оптимизационную и запуск расчёта.

На сегодняшний день этот процесс требует от пользователя повышенной внимательности, однако его можно полностью автоматизировать, что позволит исключить ошибки, связанные с человеческим фактором.

Список литературы

1. Симонов К. Г. и др. Сверхмощный 20-МВт клистрон S-диапазона частот // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. – 2023. – вып. 3(559). – С. 76–81.
2. Куцаев С. В. Перспективные технологии для прикладных резонансных ускорителей заряженных частиц и примеры их использования (Обзор) // ЖТФ. – 2021. – Т. 91. – вып. 2. – С. 173–206.