

**Численное моделирование анализатора параметров электронных пучков мощных гиротронов**

А. В. Климов, В. Н. Мануилов

*Впервые разработана методика численного моделирования анализатора винтовых электронных пучков (ВЭП) гиротронов, работающего на принципе тормозящего электрического поля. Методика учитывает трехмерность распределения электрического поля и позволяет проводить анализ схем анализаторов с различной конфигурацией электродов в области торможения электронного пучка с целью определения погрешностей измерений питч-фактора, скоростного разброса и вида функции распределения по осцилляторным скоростям, вносимых за счет сложной трехмерной пространственной структуры тормозящего поля. Методика применима для расчета степени искажения функции распределения при различных входных функциях распределения по осцилляторным скоростям, реализующихся в системах формирования ВЭП с различными топологиями пучков (пограничный, ламинарный, регулярно пересекающийся, перемешанный).*

*Ключевые слова:* гиротрон, винтовой электронный пучок, метод тормозящего поля, питч-фактор, скоростной разброс.

**Ссылка:** Климов А. В., Мануилов В. Н. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 1. С. 63.

**Reference:** A. V. Klimov and V. N. Manuilov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (1), 63 (2019).

**Введение**

Гиротроны [1–3] представляют собой разновидность мазеров на циклотронном резонансе (МЦР), в которых энергия электромагнитного поля черпается из активной среды – винтового электронного пучка (ВЭП), формируемого магнетронно-инжекторной пушкой (МИП) [4].

Среди других источников мощного когерентного электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн гиротроны обладают рядом существенных преимуществ, а именно: высокая частота, большая выходная мощность СВЧ-излучения, относительная дешевизна и компактность. Указанные преимущества дают возможность успешно использовать гиротроны во множестве перспективных и активно развивающихся научных и технических

приложений, таких как СВЧ-обработка материалов и диагностика различных сред, спектроскопия, биология, химия, обнаружение опасных веществ, нагрев и стабилизация плазмы в установках термоядерного синтеза, а также ряд других [5–7].

Доля энергии, которую может отдать электронный пучок при взаимодействии с СВЧ-полем в рабочей области гиротрона (электронный КПД  $\eta_e$ ), а также сценарий межмодового взаимодействия [8, 9] существенным образом зависят от качества формируемого ВЭП, прежде всего, от питч-фактора  $g$  (отношения средней вращательной скорости к средней скорости дрейфа вдоль магнитного поля в рабочем пространстве гиротрона) и вида и ширины  $\delta v_{\perp}$  функции распределения электронов по осцилляторным скоростям  $f(v_{\perp}) = dI/dv_{\perp}$ . Здесь  $I$  – ток пучка,  $v_{\perp}$  – вращательная скорость частиц на входе в рабочее пространство.

В настоящее время теоретический расчет основных параметров ВЭП, т. е.  $g$ ,  $\delta v_{\perp}$  и  $f(v_{\perp})$ , как правило, проводится на базе двумерных статических моделей различной степени сложности (программы ЭПОС, EGUN и пр. [10, 11]) и основан на целом ряде упрощающих допущений. Поэтому завершающим этапом отработки электронно-оптической системы (ЭОС) гиротрона является непосредственное измерение указанных параметров и их сопоставление с теоретическими значе-

**Климов Алексей Витальевич**, магистрант.  
**Мануилов Владимир Николаевич**, профессор, д.ф.-м.н.  
Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского (ННГУ им. Н. И. Лобачевского).  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.  
Тел. 8(831) 462-32-65.  
E-mail: alexclimov@bk.ru, manuilov@rf.unn.ru

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2018 г.

© Климов А. В., Мануилов В. Н., 2019

ниями. По результатам проведенного анализа, при необходимости, производится корректировка режима работы и геометрии МИП.

Существует несколько методов измерения параметров ВЭП [12, 14, 15]. Наиболее распространенным и отработанным на данный момент является метод тормозящего электрического поля [12], основанный на предположении, что указанное поле одномерно и направлено строго вдоль оси системы. Однако конструкция соответствующего анализатора является принципиально трехмерной, что вносит погрешности в результаты экспериментальных измерений  $g$ ,  $\delta v_{\perp}$  и  $f(v_{\perp})$ . В то же время методы минимизации ошибки измерений таких анализаторов базируются на чисто качественных соображениях о распределении тормозящего поля в пространстве, а точные данные о вносимой ошибке отсутствуют.

Целью данной работы являлось определение наиболее важных факторов, вносящих погрешность в результаты измерений  $g$ ,  $\delta v_{\perp}$  и  $f(v_{\perp})$ , а также вычисление типичных величин погрешностей их измерений на примере расчета электростатического анализатора параметров ВЭП гиротрона с рабочей частотой 170 ГГц и выходной мощностью 1 МВт посредством трехмерного траекторного анализа.

### Краткое описание физики работы анализатора и методики численного моделирования

На практике для определения характеристик электронных пучков в гиротроне, в частности, функции распределения электронов по осцилляторным скоростям  $f(v_{\perp})$  на входе в пространство взаимодействия, как правило, применяется метод тормозящего электрического поля [12]. Идея метода проиллюстрирована на рис. 1.

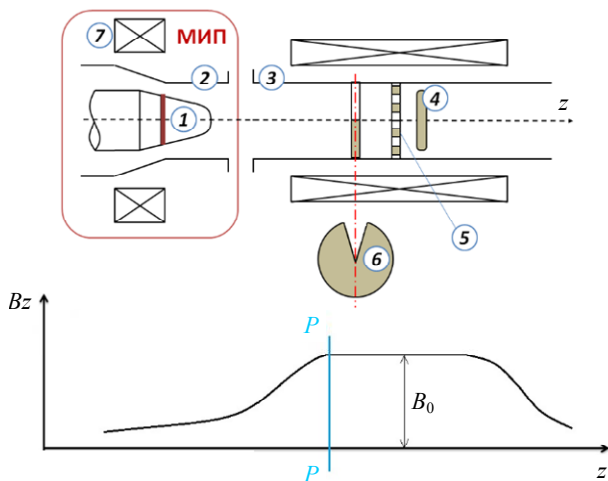


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для реализации метода тормозящего поля.

В данной схеме между катодом 1 и анодом 2 прикладывается анодное напряжение, а ускоряющее — между катодом и резонатором 3. Соленоид 7 служит для подстройки магнитного поля на катоде. Продольная компонента скорости определяется по кривой отсечки тока на коллектор 4, проходящего через диафрагму 6 при подаче тормозящего напряжения на сетку 5 в области однородного магнитного поля  $B_0$ . Отраженные от тормозящей сетки 5 электроны перехватываются при помощи диафрагмы 6 с секторным вырезом. При использовании данной схемы и методики измерений [12] функция распределения по осцилляторным скоростям определяется по формуле:

$$f(v_{\perp}) = -\frac{2U_0 v_{\perp}}{U_{\text{кол}}^{\text{max}}} \frac{dU_{\text{кол}}}{dU_T}, \quad (1)$$

где  $U_0$  — ускоряющее напряжение,  $U_{\text{кол}} = I_{\text{кол}} R_{\text{н}}$  — напряжение на коллекторе, равное произведению коллекторного тока на присутствующее сопротивление нагрузки,  $U_{\text{кол}}^{\text{max}}$  — максимальное коллекторное напряжение,  $U_T = U_0 - U_{\text{сетки}}$  — тормозящий потенциал относительно сетки,  $0 < v_{\perp} < 1$  — безразмерная поперечная скорость электронов, нормированная к полной скорости  $v = \sqrt{2\eta U_0}$ .

Поскольку в гиротронах типичные величины ускоряющих напряжений составляют от 20–30 до 80–100 кВ и выше, а токи достигают десятков ампер, то использование анализатора непосредственно в рабочем режиме не представляется возможным из-за большой вероятности пробоев промежутка сетка-диафрагма, так и перегрева коллектора мощным (до нескольких мегаватт) пучком. Поэтому все измерения проводятся в так называемом моделирующем режиме, когда ток пучка  $I$ , магнитное поле  $B$  и ускоряющее напряжение  $U$  удовлетворяют условиям подобия:

$$\begin{cases} U = U_0 / k, \\ I = I_0 / (k^{3/2}), \\ B = B_0 / (k^{1/2}). \end{cases} \quad (2)$$

В формуле (2) индекс «0» относится к рабочему режиму гиротрона,  $k$  — так называемый коэффициент моделирования (обычно  $k \approx 10$ ). При указанном изменении  $I$ ,  $U$  и  $B$ , как следует из выражения для электронно-оптического коэффициента преломления [9], электронные траектории, а значит, и измеренная функция распределения не меняются.

Вид функции распределения  $f(v_{\perp})$  зависит от степени воздействия сил пространственного заряда пучка  $F_p$  на его параметры [10] и определяется

углом наклона магнитного поля к поверхности катода  $\varphi$ . МИП может формировать пучки четырех видов: перемешанный ( $\varphi = 7-8^\circ$ ), регулярно-пересекающийся ( $\varphi = 11-13^\circ$ ), пограничный ( $\varphi = 19-22^\circ$ ) и ламинарный ( $\varphi > 25^\circ$ ). Теоретические расчеты [13] и экспериментальные измерения [10, 12] показывают, что в МИП формируются пучки только с двумя видами функции распределения – унимодальной квазигауссовской (рис. 2, кривая 1) и двугорбой (рис. 2, кривые 2, 3). Первый вид характерен для пограничного и ламинарного, а второй – для перемешанного и регулярно-пересекающегося типов пучков. В первом случае пучок, как правило, более устойчив. Несмотря на преимущество ламинарных пучков [10], технологические ограничения не всегда позволяют реализовывать соответствующие МИП. Таким образом, в гиротронах используются пучки всех типов, поэтому в ВЭП могут реализовываться как квазигауссова, так и двугорбая функции распределения. Наличие двух максимумов  $f(v_\perp)$  часто свидетельствует о неустойчивости ВЭП в рабочих режимах. Поэтому экспериментальные измерения должны с высокой степенью точности давать информацию как об основных параметрах ВЭП ( $g, \delta v_\perp$ ), так и о форме  $f(v_\perp)$ .

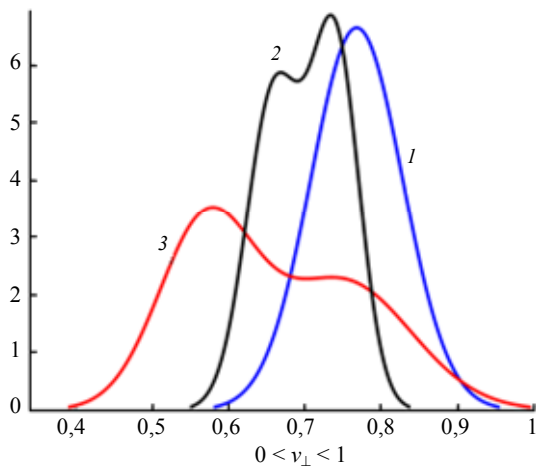


Рис. 2. Профиль рассматриваемых функций распределения. Кривые 1, 2, 3 соответственно показывают вид функций распределения  $f_1, f_2$  и  $f_3$ . На оси абсцисс отложена безразмерная поперечная скорость  $v_\perp$ .

Для определения погрешности измерений на входе анализатора (рис. 3) задается пучок с известными параметрами и заданной функцией распределения  $f(v_\perp)$ . Сформированный винтовой электронный пучок стартует в плоскости  $P$ - $P$  рабочего пространства и далее производится 3D-расчет электронных траекторий пучка внутри анализатора, позволяющий при изменении тормозящего напряжения  $U_T$  вычислить зависимость  $I_{кол}(U_T)$ , дифференцированием которой получается

измеренная функция распределения  $F(v_\perp)$  на выходе анализатора (см. формулу (1)). Сравнение заданной  $f(v_\perp)$  и восстановленной  $F(v_\perp)$  позволяет оценить ошибку измерений, вносимую анализатором за счет отличия реальной 3D-модели анализатора от упрощенной, где тормозящее поле предполагается направленным строго вдоль оси симметрии.

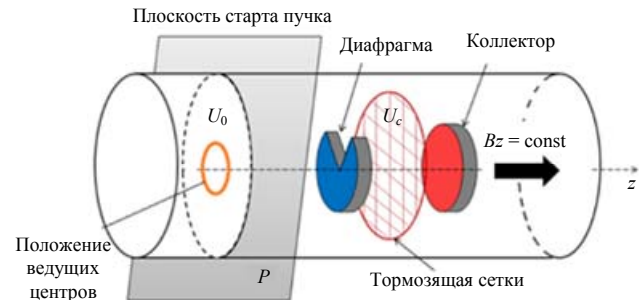


Рис. 3. Конфигурация анализатора, использованная в численном моделировании.

Для численного моделирования анализатора используется комплекс Particle Tracking программы CST STUDIO SUITE [16], позволяющий в трехмерной постановке найти решение самосогласованной системы уравнений пучка в статическом режиме по модели трубок тока. Последняя состоит из уравнений движения, уравнения связи поля и потенциала, непрерывности, уравнения Пуассона и уравнения, связывающего плотность пространственного заряда с током в многопоточном приближении.

Входные функции распределения при численном моделировании задавались в виде чисто гауссовой  $f_1$  или суперпозиции двух гауссовых функций  $f_2$  и  $f_3$ . Эти функции можно записать в следующем виде:

$$f_1(v_\perp) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}} \exp\left(-\frac{(v_\perp - \langle v_{\perp 1} \rangle)^2}{2\sigma_1^2}\right),$$

$$f_{2,3}(v_\perp) = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{2,3}^2}} \exp\left(-\frac{(v_\perp - v_{\perp 2,3})^2}{2\sigma_{2,3}^2}\right) + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{2,3'}^2}} \exp\left(-\frac{(v_\perp - v_{\perp 2,3'})^2}{2\sigma_{2,3'}^2}\right) \right].$$

Здесь подстрочные цифры 2 и 3' соответствуют двум разным двугорбым функциям распределения.

Подбор нормированных значений  $\sigma_i$  и  $v_{\perp i}$  осуществлялся таким образом, чтобы сформировать наиболее типичные виды функций распре-

ления в ВЭП (одногоорбое  $f_1$  и двугорбые  $f_{2,3}$  распределения) и, кроме того, реализовать наиболее сложный с точки зрения расчета и последующего восстановления случай с близко расположенными пиками  $f_2$  (рис. 2).

Как известно, для реализации метода трубок тока необходимо провести дискретизацию электронного пучка и для каждой трубки тока задать координаты и скорости частиц на входе в анализатор. Весь электронный пучок на входе в анализатор можно представить как ансамбль частиц, отличающихся положением ведущего центра (если учитывается разброс по ведущим центрам  $\Delta R_0$ ), азимутом ведущего центра, фазой вращения электрона по ларморовской окружности и величиной осцилляторной скорости. Таким образом, на входе в анализируемую область пучок разбивался на  $M$  фракций по ведущим центрам, на  $J$  фракций по азимуту ведущего центра в лабораторной системе координат, на  $L$  фракций по фазе осцилляторного движения на ларморовской окружности и на  $P$  фракций по величине вращательной скорости. Продольная и поперечная компоненты скорости частиц и ток соответствующей трубки тока на входе в анализатор вычислялись исходя из заданной функции распределения по осцилляторным скоростям и интеграла энергии. Программа первоначальной дискретизации пучка и экспорта сформированного файла данных (в этом файле описываются координаты, скорости и токи каждой трубки тока) в среду CST STUDIO SUITE реализована в MATLAB.

Расчет каждой точки кривой отсечки  $U_{\text{кол}}(U_T)$  в трехмерной постановке требует использования сеток с числом узлов порядка ста миллионов и одновременно расчета нескольких миллионов электронных траекторий. В результате время расчета каждой из  $N_T$  точек кривой отсечки составляет, по крайней мере, нескольких часов машинного времени даже при возможности распараллеливания задачи в комплексе CST STUDIO SUITE. В связи с этим актуальной задачей оказывается также разработка алгоритмов, позволяющих точно восстанавливать кривую отсечки и ее производную (см. формулу (1)) по малому (несколько десятков) числу дискретных отсчетов  $N_T$ . С этой целью сначала была решена тестовая задача: по заданным аналитически функциям распределения находились соответствующие интегральные кривые отсечки  $U_{\text{кол}}(U_T)$  для разного числа точек  $N_T$ , для которых далее были применены различные способы аппроксимации  $U_{\text{кол}}(U_T)$  с последующим расчетом производной  $dU_{\text{кол}}(U_T)/dU_T$ . Сравнение исходных непрерывных функций распределения с вычисленными по  $N_T$  отсчетам дискретными функциями позволило найти наиболее экономич-

ный способ восстановления выходной функции распределения в анализаторе  $F(v_{\perp})$ .

В тестовых расчетах  $U_{\text{кол}}(U_T)$  использовались следующие алгоритмы [17]: непосредственный расчет производной методом конечных разностей, аппроксимация по методу наименьших квадратов с последующим расчетом производной от аппроксимирующего полинома, сплайн-аппроксимация  $U_{\text{кол}}(U_T)$  по  $N_T$  точкам с последующим нахождением производной сплайна конечными разностями, аналитическое дифференцирование полиномов интерполирующего кубического сплайна. Наиболее точным оказался последний метод, позволивший уже при  $N_T \sim 25-30$  восстанавливать функцию распределения с хорошей точностью во всей области ее определения и находить величину пичч-фактора и скоростного разброса с погрешностью менее 1% [17].

Для корректного вычисления восстановленной функции при моделировании реальной трехмерной конструкции анализатора были также подобраны шаги сетки потенциала, временные шаги интегрирования уравнений движения частиц и числа разбиений электронного пучка на фракции по радиусам ведущих центров, азимуту ведущего центра, фракций по фазе осцилляторного движения на ларморовской окружности и фракций по величине вращательной скорости (величины  $M, J, L, P$ ).

### Результаты численного анализа

Расчет проводился для анализатора ВЭП мощного гиротрона, используемого в программе управляемого термоядерного синтеза (УТС) и имеющего следующие параметры: ток  $I_0 = 30$  А, ускоряющее напряжение  $U_0 = 80$  кВ, рабочее магнитное поле  $B_0 = 6,8$  Тл, средний радиус пучка в резонаторе  $R_0 = 8$  мм. Рассматривался моделирующий режим с коэффициентом моделирования по напряжению  $k = 10$ .

Рассматривались три типичных вида входных функций распределения (см. предыдущий пункт и рис. 2), описанных выше.

Последующий траекторный анализ, выполненный для всех трех функций распределения, показал, что восстановленная функция распределения позволяет достаточно хорошо описать все особенности кривой распределения: наличие одного или двух максимумов, точку перегиба кривой, наличие или отсутствие унимодальности распределения (см. рис. 4). В то же время трехмерные искажения структуры тормозящего поля приводят к уширению функции распределения в области больших вращательных скоростей и таким образом несколько увеличивают измеренные величины пичч-фактора и скоростного разброса.

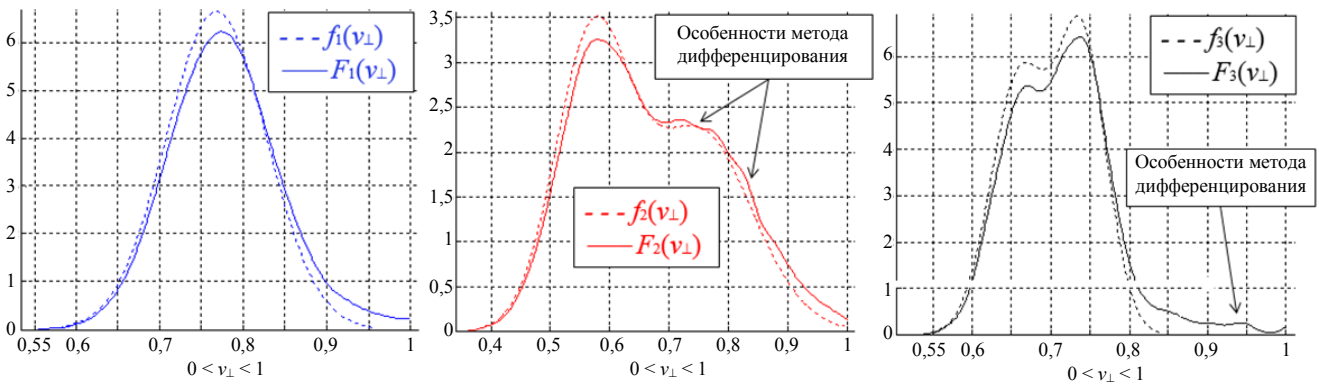


Рис. 4. Исходные (обозначены строчными буквами) и вычисленные по результатам моделирования (обозначены заглавными буквами) функции распределения по осцилляторным скоростям.

Как уже отмечалось ранее, работа реальных анализаторов строится на предположении, что электрическое поле направлено строго вдоль оси системы. Картина силовых линий электрического поля вблизи диафрагмы, представленная на рис. 5, хорошо иллюстрирует наличие тангенциальных компонент электрического поля в области пролета и торможения пучка. Таким образом, наличие тангенциальных компонент может привести к искажению измеряемых функций распределения  $F_{1,2,3}(v_{\perp})$ .

Электрическое поле в области пролета пучка (вырез диафрагмы, около прутиков сетки, между сеткой и коллектором) имеет помимо продольной еще и поперечную (тангенциальную) составляющую к оси системы (см. рис. 5). Поэтому эффективный тормозящий потенциал  $U_T^*$  оказывается меньше приложенного  $U_T$ , следовательно, электроны с большими осцилляторными скоростями оказываются способными дойти до коллектора. В результате наблюдается сдвиг вправо восста-

новленной функции распределения по осцилляторным скоростям. Сдвиг возрастает по мере увеличения  $v_{\perp}$ , поскольку большим  $v_{\perp}$  соответствуют малые продольные скорости и малые величины  $U_T$ . В результате даже небольшая разница  $(U_T - U_T^*) \sim U_T$  может привести к увеличению тока на коллектор. Важно отметить, что эффект смещения правого края функции распределения вплоть до  $v_{\perp} = 1$  наблюдается и в эксперименте [12].

Определенную роль в искажении функции распределения, как показывают оценки и расчеты, играет также сильная неоднородность (т. е. неадиабатичность) электрического поля в области торможения. В случае нарушений условий адиабатичности может происходить перераспределение энергии между продольным и вращательным движениями и, в принципе, возможно дополнительное искажение функции распределения [10]. Указанные эффекты наблюдаются, прежде всего, в области выреза диафрагмы, у прутиков сетки и между сеткой и коллектором.

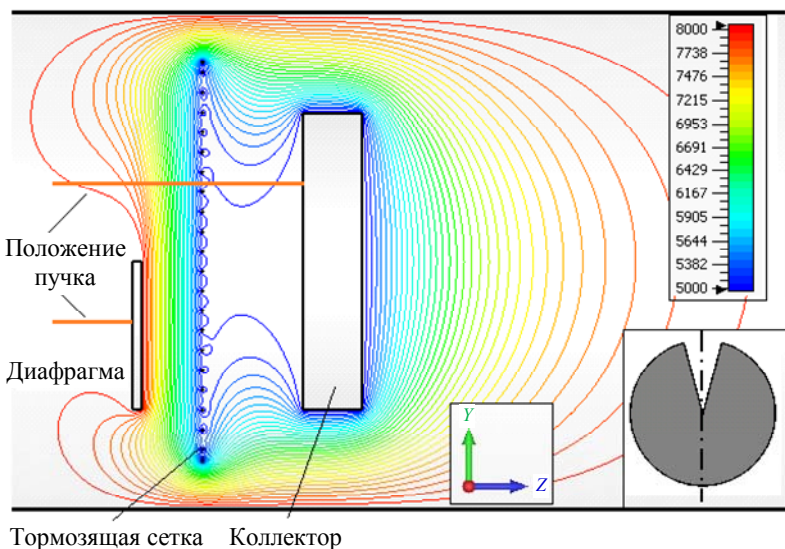


Рис. 5. Типичная форма эквипотенциальных поверхностей в анализаторе ВЭП.



Полученные причины погрешностей анализатора необходимо учитывать при экспериментальной отработке электронно-оптических систем гиротронов, особенно при использовании ВЭП с большими значениями питч-факторов.

### Заключение

В работе впервые разработана методика численного моделирования анализатора ВЭП, работающего на принципе тормозящего электрического поля. Методика учитывает трехмерность распределения электрического поля и позволяет проводить анализ схем анализаторов с различной конфигурацией электродов в области торможения электронного пучка с целью определения погрешностей измерений питч-фактора, скоростного разброса и вида функции распределения по осцилляторным скоростям, вносимых за счет сложной трехмерной пространственной структуры тормозящего поля. Предложенный способ моделирования позволяет рассчитывать погрешность и степень искажения восстановленных функций распределения при различных видах входных функций распределения по осцилляторным скоростям.

Показано, что наличие тангенциальной компоненты тормозящего электрического поля в области пролета пучка приводит к смещению измеренных функций распределения в область больших осцилляторных скоростей и уширению функции распределения, что ведет к увеличению измеренных значений скоростного разброса и питч-фактора по сравнению с реально существующими в пучке. Найденные в работе искажения функций распределения необходимо учитывать при использовании измеренных параметров ВЭП, особенно в режимах работы МИП, соответствующих большим (более 1,3–1,4) значениям питч-фактора.

Развитая методика позволяет рассчитывать анализаторы с различными геометрическими конфигурациями и на этой основе проводить оптимизацию геометрии с целью повышения точности измерений. Разработанные алгоритмы оценки точности измерений функции распределения могут быть далее обобщены и использованы для расчета новых типов анализаторов, а именно, на основе магнитного зеркала и сферического электростатического анализатора [14, 15].

Авторы благодарны А. Н. Куфтину за многочисленные полезные обсуждения результатов работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-02-00674.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., Tai E. M., Azizov E. A., Ilin V. I. // Int. J. IRMM&THz Waves. 2011. Vol. 32. No. 3. P. 337.
2. Гапонов-Грехов А. В., Петелин М. И. Мазеры на циклотронном резонансе. В кн.: Наука и человечество. – М., 1980, С. 283–297. [A.V Gaponov-Grekhov, M.I Petelin, *Science and Mankind* (Znanie, Moscow, 1980)].
3. Thumm M. // KIT Scientific Reports. 2014. Vol. 7662. P. 1–138.
4. Gol'denberg A. L., Petelin M. I. // Radiophys. Quantum Electron. 1973. Vol. 16. No. 1. P. 106.
5. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., Tai E. M., Azizov E. A., Ilin V. I. // J. Infrared Millim. Terahertz Waves. 2011. Vol. 32. No. 3. P. 337.
6. Bratman V., Glyavin M., Idehara T., Kalynov Y., Luchinin A., Manuilov V., Mitsudo S., Ogawa I., Saito T., Tatematsu Y., Zapevalov V. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 37. No 1. P. 36.
7. Glyavin M. Yu., Idehara T., Sabchevski S. P. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015. Vol. 5. No. 5. P. 788.
8. Nusonovich G. S. Introduction to the Physics of Gyrotrons – John Hopkins University Press, 2004.
9. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2012. [S. E. Tsimring, *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics* (John Wiley & Sons, Inc., 2007)].
10. Krivosheev P. V., Lygin V. K., Manuilov V. N., Tsimring Sh. E. // Int. J. of Infrared and MM waves. 2001. Vol. 22. No. 8. P. 1119.
11. Hermannsfeldt W. B. Electron Trajectory Program – SLAC Report 226, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 1979.
12. Kuftin A. N., Lygin V. K., Manuilov V. N., Postnikova A. S., Zapevalov V. E. // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. 1999. Vol. 20. No. 3. P. 361.
13. Lygin V. K. // Int. J. of Infrared and MM waves. 1995. Vol. 16. No. 2. P. 363.
14. Zaitsev N. I., Ilyakov E. V., Kulagin I. S., Shevchenko A. S. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2006. Vol. 49. No. 2. P. 120.
15. Лукша О. И., Цыбин О. Ю. // Труды ЛГТУ. 1991. № 436. С. 39.
16. Описание возможностей модуля CST PARTICLE STUDIO [Электронный ресурс]. <https://www.cst.com/products/cstps>.
17. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1978. [G. Korn and T. Korn, *Mathematical Handbook* (Mcgraw-Hill Book Company, New York-London, 1968)].

## Numerical simulation of electrostatic analyzer of helical electron beams in powerful gyrotrons

A. V. Klimov and V. N. Manuilov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
23 Prospekt Gagarina, 603950, Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: manuilov@rf.unn.ru

Received December 17, 2018

*The new approach of numerical simulation of electrostatic analyzer of gyrotrons helical electron beams based on the retarding electric field method is developed. The method takes into account three-dimensional distribution of the electric field and allows investigate different schemes of analyzers having various shapes of electrodes and applying to find the deviations in the measured values of pitch-factor, velocity spread and oscillatory velocity distribution function caused by the complicated 3-dimensional distribution of the retarding electric field. The developed approach can be applied for estimation of the distortion of the oscillatory velocity distribution function in different gyrotron electron-optic systems forming helical electron beams of different kinds (laminar, boundary, regular intersecting and mixed).*

*Keywords:* gyrotron, helical electron beam, retarding field, pitch factor, velocity distribution.

### REFERENCES

1. A. G. Litvak, G. G. Denisov, V. E. Myasnikov, E. M. Tai, E. A. Azizov, and V. I. Il'in, *Int. J. IRMM&THz Waves* **32** (3), 337 (2011).
2. A. V. Gaponov-Grekhov and M. I. Petelin, in Book: *Science and Mankind* (Znanie, Moscow, 1980) [in Russian].
3. M. Thumm, *KIT Scientific Reports* **7662**, 1 (2014).
4. A. L. Gol'denberg and M. I. Petelin, *Radiophys. Quantum Electron.* **16** (1), 106 (1973).
5. A. G. Litvak, G. G. Denisov, V. E. Myasnikov, E. M. Tai, E. A. Azizov, and V. I. Ilin, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* **32** (3), 337 (2011).
6. V. Bratman, M. Glyavin, T. Idehara, Y. Kalynov, A. Luchinin, V. Manuilov, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Saito, Y. Tatematsu, and V. Zapevalov, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** (1), 36 (2009).
7. M. Yu. Glyavin, T. Idehara, and S. P. Sabchevski, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **5** (5), 788 (2015).
8. G. S. Nusonovich, *Introduction to the Physics of Gyrotrons* (John Hopkins University Press, 2004).
9. S. E. Tsimring, *Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics* (John Wiley & Sons, Inc., 2007; IAP RAS, Nizhny Novgorod, 2012).
10. P. V. Krivosheev, V. K. Lygin, V. N. Manuilov, and Sh. E. Tsimring, *Int. J. of Infrared and MM Waves* **22** (8), 1119 (2001).
11. W. B. Hermannsfeldt, *Electron Trajectory Program* (SLAC Report 226, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 1979).
12. A. N. Kuftin, V. K. Lygin, V. N. Manuilov, A. S. Postnikova, and V. E. Zapevalov, *Int. J. Infrared and Millimeter Waves* **20** (3), 361 (1999).
13. V. K. Lygin, *Int. J. of Infrared and MM Waves* **16** (2), 363 (1995).
14. N. I. Zaitsev, E. V. Ilyakov, I. S. Kulagin, and A. S. Shevchenko, *Radiophysics and Quantum Electronics.* **49** (2), 120 (2006).
15. O. I. Louksha and O. Yu. Tsybin, *Trudy LGTU*, No. 436, 39 (1991).
16. <https://www.cst.com/products/cstps> (CST PARTICLE STUDIO).
17. G. Korn and T. Korn, *Mathematical Handbook* (Mcgraw-Hill Book Company, New York-London, 1968; Nauka, Moscow, 1978).