

33. Арланцев С. В., Гочелашвили К. С., Евдокимова О. Н. и др. // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 2. С. 124.  
34. Mangano J. A. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. № 6. P. 487.

35. Мхеидзе Г. П., Раевский И. М., Рухадзе А. А. и др. // Прикладная физика. 2005. № 4. С. 60.

Статья поступила в редакцию 25 октября 2007 г.

## Formation and application of the pulse high-current electron beams

### Part II. Accelerators of a direct action. Generation of microwave and laser radiation

G. P. Mkheidze, A. A. Savin

A. M. Prokhorov's General Physics Institute of the RAS, Moscow, Russia

*Some results of researches of the plasma diodes and the beam plasma are resulted in the brief form. The review of works is broken into four parts. The second part describes works on creation of generators of a pulse voltage, electron accelerators of a direct action and on use of relativistic electron bunches in applied purposes.*

УДК 621.385: 537.533

## Некоторые методологические вопросы решения задач оптимизации интенсивных пучков заряженных частиц

Д. О. Беляев, В. М. Свешников

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

*Рассмотрены некоторые методологические особенности решения задач оптимизации интенсивных пучков заряженных частиц на примере модельной задачи о пушке Пирса. Исследованы поведение функции цели, ее чувствительность к изменению параметров, поэлектродный подход к оптимизации.*

### Введение

Побудительным мотивом к исследованиям, проведенным в настоящей работе, явилась попытка авторов провести численную оптимизацию модельной задачи, состоящей в следующем. Требовалось получить параллельный пучок заданных тока и размера в двухэлектродной системе путем варьирования формы электродов, т. е. численно, исходя из некоторой начальной конфигурации электродов, а также пушку Пирса. За начальное приближение был взят плоский диод, электроды разбивали на заданное число звеньев. Численное решение задачи оптимизации дало результат, далекий от теоретического. В связи с этим были проведены более детальные исследования, нап-

равленные не столько на сокращение объема вычислений, что безусловно является важным фактором, сколько на получение адекватного решения в принципе. Была выполнена серия расчетов по решению данной задачи с различными начальными данными и вариантами разбиения электродов. Ниже приведены результаты этих расчетов и их обсуждение.

Задача оптимизации интенсивных пучков заряженных частиц рассматривалась рядом авторов [1, 2]. Подчеркнем, что отличительной особенностью настоящей работы является то, что она посвящена некоторым методологическим аспектам, знание которых представляется полезным при решении данной задачи каким-либо численным методом.

### Постановка задачи и краткое описание алгоритмов ее решения

Математически рассматриваемая задача формулируется следующим образом. Пусть  $\vec{p} = p_1, p_2, \dots, p_N$  — вектор параметров электронно-оптической системы. Требуется найти вектор  $\vec{p}^*$ , такой, что

$$F^0 \vec{p}^* = \min_{\vec{p}} F^0 \vec{p}$$

при заданных условиях на допустимые изменения параметров

$$\vec{\alpha} \leq \vec{p} \leq \vec{\beta} \quad (1)$$

и функциональных ограничений вида

$$F^k \vec{p} \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

где  $F^0$  — функция цели;

$\vec{\alpha}, \vec{\beta}$  — заданные векторы;

$F^k, k = 1, 2, \dots, m$  — функции ограничений.

Задача оптимизации решалась методом внутренней точки с использованием барьерной функции в комбинации с методом градиентного спуска. Суть метода внутренней точки [3] состоит в том, что текущая точка постоянно находится внутри допустимой области изменения параметров, что достигается путем построения штрафной (барьерной) функции вида

$$P(\vec{p}, r) = F^0(\vec{p}) + r \sum_{i=1}^m R_i(F^i(\vec{p}))w_i,$$

где  $r > 0$  — параметр, значения которого убывают с каждым шагом оптимизации;

$$R_i(t) \rightarrow \infty \text{ при } t \rightarrow 0;$$

$w_i$  — положительные весовые коэффициенты.

При этом барьерная функция неограниченно возрастает при  $t \rightarrow 0$ . Примерами барьерных функций могут служить функции вида:  $R_i = \frac{1}{F^i}$ ;

$R_i = -\ln(F^i)$ . При приближении к границе изнутри области, как только  $F^i \rightarrow 0$ , штраф  $R_i$  становится большим, т. е. вдоль всех границ допустимой области изменения параметров образуются сильные барьеры.

Минимизация барьерной функции выполнялась градиентным методом безусловной оптимизации [4].

### Численные эксперименты и выводы

Ставилась задача получения пучка, параллельного оси симметрии (оси  $y$ ) двухэлектродной системы, заданных тока и размера. Геометрия системы была плоской и рассматривалась в декартовой системе координат  $x, y$ .

Функцией цели служила величина отклонения  $\delta$  траекторий от прямой, параллельной оси симметрии, вычисляемая как

$$\delta = \max \delta_{n,k}, \quad \delta_{n,k} = |x_{n,k} - X|,$$

где  $n = \overline{1, N_T}$  — номер траектории ( $N_T$  — число траекторий);

$k$  — номер точки траектории;

$X$  — определяет прямую  $x = X$  (предполагается, что пучок движется в направлении оси  $y$ ).

Электроды (фокусирующий электрод и анод) разбивались на заданное число  $N_p$  звеньев прямыми, параллельными оси симметрии. Каждое звено ломаной являлось также отрезком прямой. Варьируемыми параметрами  $p_i$  были углы наклона  $\theta_i$  звеньев фокусирующего электрода и  $\gamma_i$  — звеньев анода к оси симметрии. Эти углы определяют координаты вершин звеньев, которые обозначим, соответственно, как  $x_{f,i}$  и  $x_{a,i}$   $i = \overline{1, N_p}$ .

Параметры оптимизации должны удовлетворять следующим естественным ограничениям вида (1)

$$0 \leq x_{f,i} \leq x_{a,i} \leq d,$$

где  $d$  — продольный (вдоль оси  $y$ ) размер системы.

Ограничение вида (2) в данном случае накладывается на функцию  $F^1$  отклонения тока пучка  $I$  от заданного значения  $I^*$ . Оно определяется формулой

$$F^1 = |I - I^*| \leq \epsilon_I,$$

где  $\epsilon_I$  — заданная малая величина.

В численных расчетах продольный и поперечный размеры системы были равны  $10^{-3}$  см, поперечный размер пучка  $0,2 \cdot 10^{-3}$  см, ток пучка  $4,66 \cdot 10^{-6}$  А. Электроды разбивали на  $N_p = 1, 2, 4$  частей.

### Заключение

Проведенные расчеты показали следующее.

1. Функция цели имеет несколько локальных минимумов, поэтому при различных начальных приближениях процесс локальной оптимизации давал различные результаты. Для выхода из ло-

кального минимума увеличивали шаг оптимизации до тех пор, пока градиенты  $E_i$  изменения параметров имели значения по модулю, большие заданной величины  $\epsilon = 10^{-3}$ . Такая глобальная оптимизация давала приблизительно одинаковые результаты при различных параметрах разбиения электродов и различных начальных значениях углов наклона  $\theta_i$  и  $\gamma_i$ .

2. Чувствительность функции цели к изменению параметров, мерой которой служили  $|E_i|$ , резко (до 10 и более раз) падала с увеличением  $i$  (принята нумерация снизу вверх). Это обстоятельство также создает трудности при проведении оптимизации, так как при этом функцию цели изменяют только ближайшие к пучку звенья, а периферийные могут занимать произвольное положение. Поэтому было принято решение, согласно которому периферийные звенья в случае, если отношение

$$g_i = \left| \frac{E_i}{E_1} \right|, \quad i > 1$$

мало, имеют тот же угол наклона, что и звено, ближайшее к пучку. Это решение отвечает требованию технологичности изготовления электродов в практических конструкциях.

3. Эффективным оказался поэлектродный подход к оптимизации, суть которого состояла в том, что сначала проводили оптимизацию фокусирующего электрода при заданном положении анода, а затем анода при полученной конфигурации фокусирующего электрода и только после этого — процесс общей оптимизации. Если при этом анод на первом этапе имел близкую к решению форму (прямую, перпендикулярную пучку), то общая оптимизация сходилась за один–два шага.

4. Градиенты  $E_i$  (рис. 1) резко падают при приближении к решению, что вызывает необходимость увеличения шага оптимизации вблизи него.

Сказанное выше иллюстрируется данными, приведенными в таблице и на рис. 2, а—в.

Углы наклона звеньев фокусирующего электрода, полученные в результате оптимизации

$N_p$	$\theta_0$ , град		
	52,5	65	77,5
1	67,46	67,46	67,46
2	60,04	66,44	68,54
	68,68	67,83	68,75
4	65,13	64,8	69,36
	65,13	64,85	71,5
	53,5	59,96	63,16
	73,54	70,74	68,81

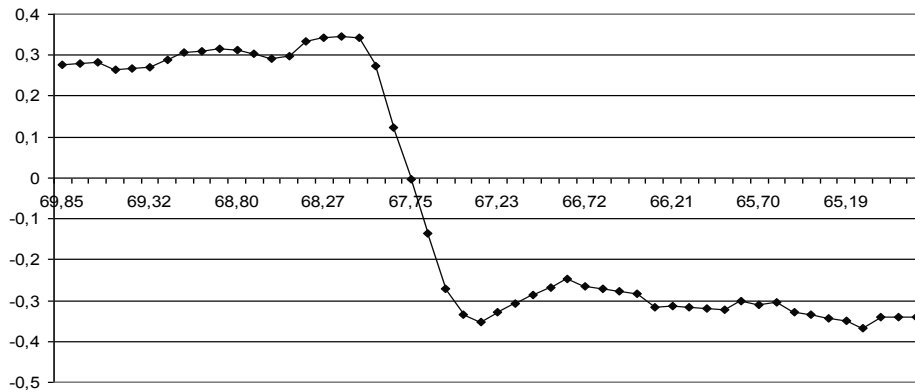


Рис. 1. Поведение градиента изменения параметров в зависимости от угла наклона фокусирующего электрода

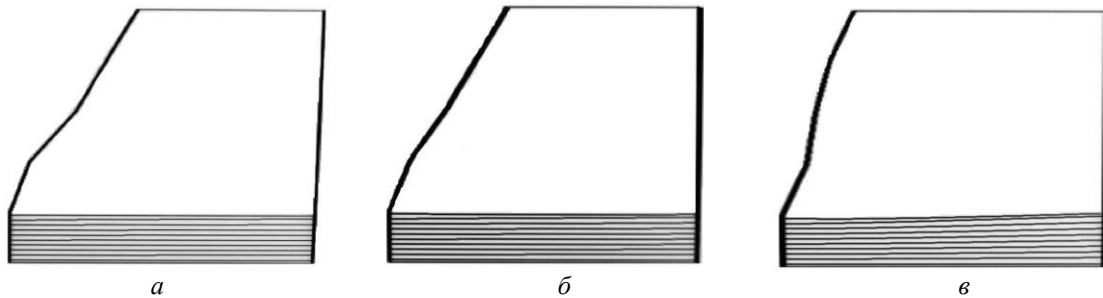


Рис. 2. Конфигурации электродов и пучок, полученные в результате оптимизации при различных начальных углах наклона  $\theta_0$ , фокусирующего электрода, град:  
а — 52,5; б — 65; в — 77,5

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 05-01-00487.

#### Литература

1. Кузьмин В. М., Свешников А. Г., Семашко Н. Н., Якунин С. А. // Ж. вычислительной математики и математической физики. 1981. Т. 21. № 5. С. 1332—1338.

2. Овсянников Д. А. Моделирование и оптимизация динамики пучков заряженных частиц. — Л.: ЛГУ, 1990.

3. Nesterov Yu. E. // Mathematical Programming. 1997. V. 79. P. 285—297.

4. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. — М.: Мир, 1982.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

## Some methodological features of the solving of optimization problems of intensive charged particle beams

D. O. Beljaev, V. M. Sveshnikov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,  
Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

*Some methodological features of the solving of optimization problems of intensive charged particle beams on an example of a test problem about a Pierce's gun are considered. The behavior of the purpose function, its sensitivity to a change of the parameters, and step by step approach to an optimization is investigated.*

УДК 621.385.6

## Исследование динамики нестационарного электронного пучка в электронно-оптических системах электровакуумных приборов

С. О. Семенов

ФГУП «Научно-производственное предприятие "Алмаз"», г. Саратов, Россия

*Исследованы характеристики одно-, двух- и четырехступенчатых коллекторов для ламп бегущей волны (ЛБВ) с различными отношениями их размеров и длины замедленной волны; определены отличия результатов расчета при нестационарном и стационарном подходах и влияние остаточной группировки пучка. Рассмотрена динамика образования виртуального катода при торможении моноскоростного и модулированного электронных пучков.*

### Введение

В работе [1] приведены описание алгоритма и результаты исследований динамики нестационарного электронного пучка в двух- и четырехступенчатых коллекторах ЛБВ, показаны отличия результатов расчетов при стационарном и нестационарном подходах, влияние степени группировки пучка и эффекта запаздывания на характеристики коллекторов для случая, когда длина замедленной волны в 4,5—5 раз меньше размеров коллекторов. В настоящей статье приведены результаты расчетов одно-, двух- и четырехступен-

чатых коллекторов при изменении соотношений указанных длин, рассмотрена динамика образования виртуального катода при торможении осесимметричного электронного пучка с модуляцией по скорости и плотности и без нее.

### Результаты расчета характеристик коллекторов

Рассмотрены коллекторы с различными размерами, которые изменялись примерно пропорционально относительно первоначальной конструкции, причем