



В. И. Абрамов А. В. Губин

008-91

П
Д 16

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
И ВЫБОР ДОПУСКОВ
ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
МАГНИТНЫХ МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ**

Москва 1991

Государственный комитет СССР
по народному образованию

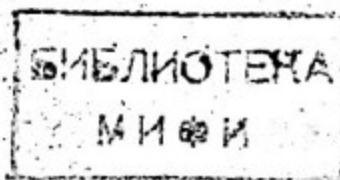
Московский ордена Трудового Красного Знамени
инженерно-физический институт

В.И.Абрамов А.В.Губин

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ И ВЫБОР
ДОПУСКОВ ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАГНИТНЫХ
МАСС-АНАЛИЗАТОРОВ

Препринт 008-91

Утверждено
редсоветом института



Москва 1991

УДК 519.6

Абрамов В.И., Губин А.В. Многокритериальная оптимизация и выбор допусков ионно-оптических систем магнитных масс-анализаторов. М.: Препринт/МИФИ, 008-91. - 16с.

Разработан метод многокритериальной оптимизации ионно-оптических систем магнитных масс-анализаторов, позволяющий получить оптимальные значения параметров конструктивных элементов с учетом технологических допусков. Проведен сравнительный анализ разработанного метода с градиентным. Показано преимущество найденных ионно-оптических схем анализаторов перед известными.

© Московский инженерно-физический институт, 1991.

Рукопись поступила в редакционный отдел 13.03.91

Редактор Н.Н. Антонов

Ответственный за выпуск В.И. Абрамов

Подписано в печать 22.04.91 Формат 60x84 1/16

П.л. 1 . Уч.-изд.л. 1 Тираж 120 экз.
Изд. № 008-91 Заказ 967 Цена 5 коп.

Московский инженерно-физический институт. Типография МИФИ.
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

В В Е Д Е Н И Е

Разработка ионно-оптических систем (ИОС) приборов на основе математического моделирования включает важный этап - выбор таких параметров схемы, которые дают наилучшие характеристики устройства. Как правило, ИОС масс-анализатора характеризуется несколькими критериями качества, например разрешающей способностью, коэффициентом пропускания и др. При моделировании ИОС желательно так подобрать допустимые значения параметров конструкции, чтобы все критерии качества системы принимали возможно меньшие (или большие) значения. Однако это условие обычно бывает невыполнимо: минимизация какого-нибудь одного критерия качества приводит к увеличению других. Поэтому задача многокритериальной оптимизации состоит в том, чтобы определить подмножество неулучшаемых (парето-оптимальных) вариантов систем, т.е. таких, которые нельзя одновременно улучшить по всем критериям качества. Вместе с тем, многие авторы (см. например, [1,2]) пытаются свести многокритериальные задачи к однокритериальным, для чего строится целевая функция, являющаяся сверткой многих критериев с некоторыми коэффициентами. Известно, что при оптимизации по целевой функции с разными весовыми коэффициентами получаются существенно разные результаты. В отличие от многокритериального выбора, в этом случае происходит подмена одной задачи другой, имеющей мало общего с исходной, т.к. критерий качества не соответствует физической сути задачи.

Одним из наиболее эффективных и универсальных методов является МП-поиск, предложенный в работе [3]. Указанный метод использовался при оптимизации различных конструкций и систем и дал хорошие результаты. Вместе с тем, во многих практических случаях большие затраты времени и средств на получение результатов оптимизации ИОС оказываются неоправданными из-за слишком большой чувствительности оптимальной схемы к изменениям параметров, в результате чего эта схема практически оказывается неработоспособной. Одним из способов преодоления этого затруднения является постановка задачи оптимизации с учетом требований чувствительности критериев качества системы к технологическим допускам. Эффективный метод анализа

чувствительности нелинейных многопараметрических систем на основе ЛП_Т-последовательностей был предложен в работе [4].

В данной работе приводятся результаты многокритериальной оптимизации секторных магнитных анализаторов заряженных частиц по методу, предложенному в [5], и с учетом опыта практической работы предлагается алгоритм оптимизации ИОС, позволяющий эффективно осуществлять поиск оптимальных параметров с анализом влияния допусков конструктивных элементов ИОС.

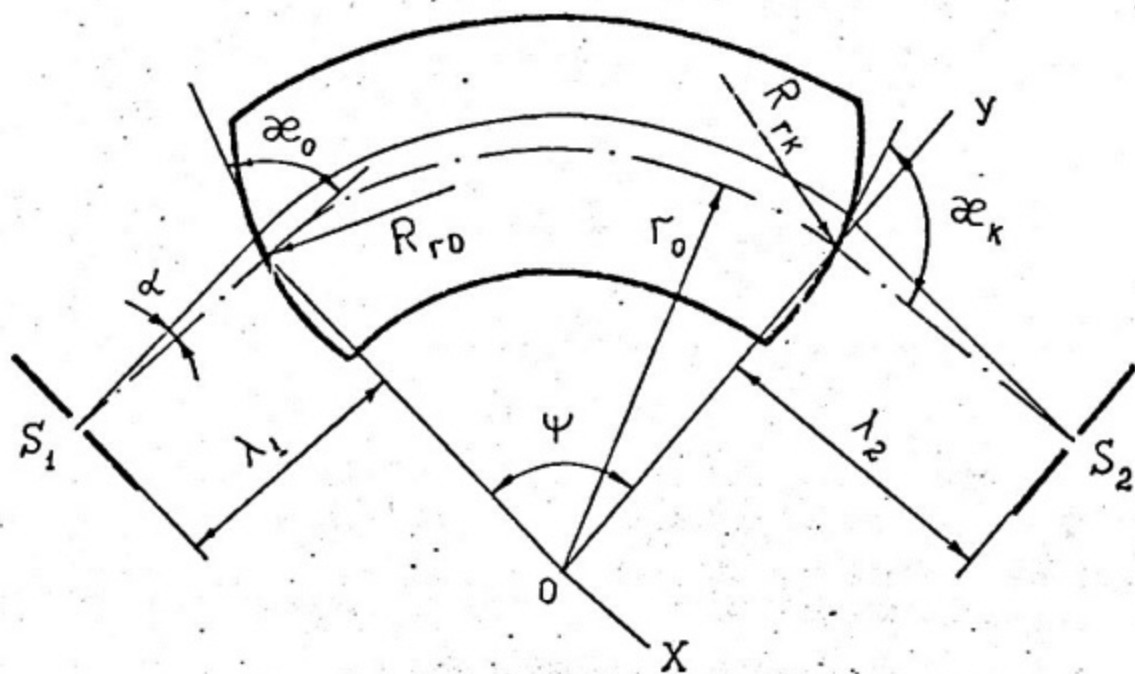
1. Метод расчета ИОС анализатора

Расчет ионно-оптических систем анализаторов проводился с помощью пакета прикладных программ [6], использующего результаты теории статических масс-анализаторов, предложенной в [7]. Известно, что анализатор характеризуется следующими геометрическими параметрами: радиус кривизны средней траектории пучка ионов (r_0), угол сектора поля (Ψ), входное плечо (λ_1), выходное плечо (λ_2), угол наклона входной границы (α_0), угол наклона выходной границы (α_k), кривизна входной и выходной границ ($R_{гс}$ и $R_{гк}$) (см. схему). Напомним, что координаты ионов за выходной границей анализатора в плоскости, перпендикулярной средней траектории, в теории [7] получены в виде

$$\Delta(\lambda) = \frac{y-r_0}{r_0} = \sum_{i=1}^6 \Delta_i(\lambda) \alpha_i + \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \Delta_{ij}(\lambda) \alpha_i \alpha_j, \quad (1)$$

$$\Lambda(\lambda) = \frac{z}{r_0} = \sum_{i=1}^6 \Lambda_i(\lambda) \alpha_i, \quad (2)$$

где $\Delta(\lambda)$ и $\Lambda(\lambda)$ - соответственно радиальная и аксиальная координаты одной из траекторий ионного пучка относительно его средней траектории в единицах r_0 ; $\Delta_i(\lambda)$, $\Delta_{ij}(\lambda)$, $\Lambda_i(\lambda)$ - безразмерные коэффициенты, зависящие от параметров анализатора; $\lambda = x/r_0$, α_i - малые параметры, характеризующие траекторию иона на выходе из щели источника ионов. Малые параметры имеют следующие значения: $\alpha_1 = \text{tg } \alpha$, где α - угол наклона проекции траектории иона на среднюю плоскость к средней траектории; $\alpha_2 = \text{tg } \beta$, где β - угол наклона траектории к средней плоскости; $\alpha_3 = S/r_0$, где S - координата траектории иона относительно средней



Ионно-оптическая схема магнитного масс-анализатора:

x, y, z - декартовы координаты, причем координата z перпендикулярна плоскости рисунка в точке O ; λ_1, λ_2 выражены в единицах r_0 .

траектории в радиальной плоскости; $\alpha_4 = h/r_0$, где h - координата траектории иона относительно средней траектории в аксиальном плоскости; α_5 и α_6 - относительные отклонения энергии и массы иона от значений, соответствующих движению по средней траектории.

Расчет коэффициентов $\Delta_i(\lambda)$ и $\Lambda_i(\lambda)$ проводится по формулам

$$\Delta_i(\lambda) = f_i + \lambda(f'_i - b_1 f_i), \quad (3)$$

$$\Lambda_i(\lambda) = F_i + \lambda(F'_i - b_1 F_i), \quad (4)$$

где $f_i = m_i \sin \psi + l_i \cos \psi + 0,5(\delta_{i5} + \delta_{i6})(1 - \cos \psi)$;

$$f'_i = m_i \cos \psi - l_i \sin \psi + 0,5(\delta_{i5} + \delta_{i6}) \sin \psi;$$

$$F_i = \xi_i \psi + t_i; \quad F'_i = \xi_i;$$

$$m_1 = 1 + a_1 \lambda_1, \quad m_3 = a_1, \quad l_1 = \lambda_1, \quad l_3 = 1,$$

$$\xi_2 = 1 - a_1 \lambda_1, \quad \xi_4 = -a_1, \quad t_2 = \lambda_1, \quad t_4 = 1,$$

$$a_1 = \operatorname{ctg} \alpha_0, \quad b_1 = \operatorname{ctg} \alpha_k,$$

остальные m_i, l_i, ξ_i, t_i равны нулю.

Значения коэффициентов $\Delta_{ij}(\lambda)$ вычисляются по аналогичным формулам, но более громоздким (см.[7]) и поэтому здесь не приводятся.

Условие фокусировки первого порядка по углу радиальной расходимости определяется выражением

$$\Delta_1(\lambda) = 0, \quad (5)$$

которое преобразуется к виду

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\lambda_1(1 - b_1 \lambda_2) + \lambda_2(1 + a_1 \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2 - (1 + a_1 \lambda_1)(1 - b_1 \lambda_2)}. \quad (6)$$

Из этого уравнения находится значение выходного плеча анализатора. Расчет радиального увеличения (M_r) и дисперсии (D_γ) выполняется по формулам

$$M_r = \Delta_3(\lambda_2), \quad (7)$$

$$D_\gamma = r_0 \Delta_6(\lambda_2) \alpha_6. \quad (8)$$

Тангенс угла наклона касательной к линии фокусов в точке

пересечения со средней траекторией рассчитывается по формуле

$$\operatorname{tg} \theta_{\gamma} = \frac{(1+a_1\lambda_1)\sin\psi + \lambda_1\cos\psi}{\lambda_2} \frac{\Delta_6(\lambda_2)}{\Delta_{15}(\lambda_2)}. \quad (9)$$

Сферическая aberrация характеризуется коэффициентом $\Delta_{11}(\lambda_6)$.

Для расчета разрешающей способности анализатора по основанию массового пика (R) удобен метод координатного спуска [8], базирующийся на использовании формулы

$$\frac{1}{R} = \left| \sum_{i=0}^5 \frac{\Delta_i}{\Delta_6} (\alpha'_i - \alpha_i) + \sum_{j=0}^5 \sum_{i=0}^j \left[\frac{\Delta_{ij}}{\Delta_6} - \frac{2-\delta_{ij}}{2} \left(\frac{\Delta_i}{\Delta_6} \frac{\Delta_{j6}}{\Delta_6} + \frac{\Delta_j}{\Delta_6} \frac{\Delta_{i6}}{\Delta_6} - \frac{2\Delta_{66}}{\Delta_6} \frac{\Delta_i}{\Delta_6} \frac{\Delta_j}{\Delta_6} \right) \right] (\alpha'_i \alpha'_j - \alpha_i \alpha_j) \right|, \quad (10)$$

где $\Delta_{i0} = \Delta_{j0} = 0$, $\Delta_0 = -1$, $\alpha'_0 = S_2 / (2r_0)$, S_2 - ширина щели приемника ионов, $\alpha'_0 = -\alpha_0$, а остальные α'_i , α'_j , α_i , α_j - такие значения параметров α_i и α_j , при которых R минимально. Здесь для упрощения опущено обозначение зависимости Δ_i , Δ_{ij} от λ_2 . Формула (10) получена из условия касания границ изображений двух пучков ионов разной массы и приемной щели. Идея метода заключается в последовательном поиске минимального значения выражения, определенного формулой, по каждому малому параметру и фиксации значения параметра, соответствующего минимуму. По окончании цикла процедура повторяется, пока разность между минимальными значениями в последовательных циклах не будет меньше заданной величины. Разрешающей способности присваивается значение, полученное в последнем цикле.

Коэффициент пропускания анализатора, определяющий чувствительность масс-спектрометра, находился методом Монте-Карло: как вероятность попадания ионов регистрируемой массы в щель приемника. Для моделирования пучка ионов каждому малому параметру, характеризующему одно из начальных условий движения иона, задавались пределы изменения и закон распределения. Распределения начальных координат траекторий движения ионов принимались равномерными, а углов и отклонения энергии от среднего значения - нормальными. Используя значения

малых параметров и ранее полученных коэффициентов в уравнениях траектории, находили радиальную и аксиальную координаты разыгрываемого иона, по которым делался вывод о попадании его в щель приемника ионов. Коэффициент пропускания рассчитывался как отношение количества ионов, попавших в щель приемника, к общему количеству разыгрываемых ионов.

2. Анализ чувствительности критериев качества

Оптимизация проводилась по шести критериям качества системы: F_1 - разрешающая способность анализатора, F_2 - коэффициент пропускания анализатора, $F_3 = \Delta_{11}$ - коэффициент сферической абберации, $F_4 = |90^\circ - |\theta||$, где θ - угол наклона линии фокусов к средней траектории, F_5 - дисперсия по массам, F_6 - длина средней траектории в анализаторе, причем первые два являются наиболее важными. На первом этапе оптимизации в качестве варьируемых рассматривалось 11 параметров, пределы изменения которых указаны в табл. I.

Таблица I. Параметры и диапазоны их изменений

Параметры оптимизации		Области изменений параметров
x_1	r_0	100 - 300 мм
x_2	ϕ	$60^\circ - 120^\circ$
x_3	λ_1	0,1 - 3,0
x_4	z_0	$60^\circ - 120^\circ$
x_5	z_k	$60^\circ - 120^\circ$
x_6	R_{r0}/r_0	0,2 - 10
x_7	R_{rk}/r_c	0,2 - 10
x_8	S_1	0,01 - 1 мм
x_9	S_2	0,01 - 1 мм
x_{10}	H_1	0,5 - 10 мм
x_{11}	H_2	0,5 - 10 мм

Здесь S_1 - ширина щели источника ионов, S_2 - ширина щели приемника ионов, H_1 - высота щели источника ионов, H_2 - высота щели приемника ионов.

Первоначально определяется чувствительность всех критериев качества системы к изменению параметров:

$$S_{ji} = \sigma_{ji}^2 / \sigma_j^2, \quad (11)$$

где σ_{ji}^2 - частичная дисперсия критерия качества j к изменению параметра i , σ_j^2 - полная дисперсия критерия качества j . В методе [4] вычисление σ_{ji}^2 и σ_j^2 сводится к задаче численного нахождения интегралов:

$$\begin{aligned} \sigma_j^2 &= D[F_j(x)] = \int w(x)[F_j(x) - \bar{F}_j]^2 dx = \bar{F}_{j^2} - \bar{F}_j^2, \\ \sigma_{ji}^2 &= D[F_{ji}(x_i)] = \int w_i(x_i)[F_{ji}(x_i) - \bar{F}_{ji}]^2 dx_i = \bar{F}_{ji^2} - \bar{F}_{ji}^2, \\ F_{ji}(x_i) &= M[F(x)|x_i] = \int w_{-i|i}(x_{-i}|x_i)F(x) dx_{-i}, \\ w_{-i|i}(x_{-i}|x_i) &= w(x)/w_i(x_i), \quad w_i(x_i) = \int w(x) dx_{-i}, \quad (12) \\ \bar{F}_j &= M[F_j(x)] = \int w(x)F_j(x) dx, \quad \bar{F}_{j^2} = M[F_j^2(x)] = \int w(x)F_j^2(x) dx, \\ \bar{F}_{ji} &= M[F_{ji}(x_i)] = \int w_i(x_i)F_{ji}(x_i) dx_i = \bar{F}_j, \\ \bar{F}_{ji^2} &= M[F_{ji}^2(x_i)] = \int w_i(x_i)F_{ji}^2(x_i) dx_i. \end{aligned}$$

Как показали исследования на математических моделях различной степени нелинейности, имеющих аналитические решения, наименьшая погрешность оценок чувствительностей при заданном числе точек N_p LP_{τ} -последовательностей достигается путем вычисления многомерных интегралов с помощью M -мерных LP_{τ} -последовательностей, а одномерных интегралов при вычислении σ_{ji}^2 с помощью квадратурных формул Ньютона-Котеса с четырьмя узлами [4,5].

Результаты анализа для $N_p=256$ представлены в таблице 2. В расчетах параметры задавались равномерно распределенными. Установлено, что на все F_j параметры $x_7 = R_{гк}/r_0$ и $x_{10} = H_1$ влияют незначительно и в дальнейшем количество варьируемых параметров было сокращено до 9, а $R_{гк}$ и H_1 были присоединены значения соответственно 7 и 4 мм.

Таблица 2. Чувствительность критериев качества к изменениям параметров

Параметры	S_{1i}	S_{2i}	S_{3i}	S_{4i}	S_{5i}	S_{6i}
r_0	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
ψ	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$
λ_1	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$
x_0	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
x_k	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
R_{r0}/r_0	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
R_{rk}/r_0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
S_1	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
S_2	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
n_1	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
n_2	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$

3. Многокритериальная оптимизация

На втором этапе был осуществлен поиск оптимальных ионно-оптических схем на основе двух подходов: определялись множество допустимых и множество парето-оптимальных значений параметров. При этом в первом случае оптимизация проводилась по первым трем критериям качества. В соответствии с классической постановкой задачи оптимизации определялись значения параметров $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_9^*)$, удовлетворяющие критериальным ограничениям:

$$F_1(x) \geq 130, \quad F_2(x) \geq 0,8, \quad F_3(x) \leq 0,3. \quad (13)$$

В результате расчетов была выбрана схема с параметрами x^* , удовлетворяющая наилучшим образом всем трем критериям качества (табл. 3).

Таблица 3. Значения критериев качества и параметров

F_1	F_2	F_3	r_0	ψ	λ_1	α_0	α_k	R_{r_0}/r_0	S_1	S_2	H_2
131	0,83	0,30	267	78,2	2,28	60,7	95,9	1,96	0,08	0,8	5,1

После этого был осуществлен ЛП-поиск в окрестности этой точки. Для чего точка x^* была помещена в центр 9-мерного параллелепипеда: $0,9 x_i^* \leq x_i \leq 1,1 x_i^*$ ($i=1,2,\dots,9$). В результате были определены две схемы с улучшенными характеристиками, данные о которых представлены в таблице 4.

Таблица 4. Значения критериев качества и параметров

F_1	F_2	F_3	r_0	ψ	λ_1	α_0	α_k	R_{r_0}/r_0	S_1	S_2	H_2
329	0,98	0,30	278	73,8	2,40	61,4	102	2,19	0,17	0,81	5,4
318	0,97	0,28	267	81,1	2,04	57,1	102	1,58	0,10	0,77	5,7

При втором подходе определялись приближенные парето-оптимальные значения параметров. При этом ЛП-поиск осуществлялся по 1024 точкам ЛП-последовательностей. Для восьми приближенных парето-оптимальных точек значения критериев качества представлены в таблице 5. Следует отметить, что выбор этих точек осуществлялся по компромиссной кривой, построенной по наиболее значимым первым двум критериям. ЛП-поиск в окрестности точки NI позволил получить лучшие приближения для парето-оптимальных точек. Значения критериев качества для двух точек представлены в таблице 6.

Таблица 5. Парето-оптимальные значения критериев качества

N	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆
1	450	0,43	2,7	21	4,8	6,5
2	430	0,55	1,4	42	2,1	3,4
3	480	0,35	1,8	65	4,2	5,0
4	570	0,087	1,6	49	2,2	3,7
5	510	0,028	2,1	52	3,6	3,9
6	500	0,11	0,9	47	1,5	4,3
7	340	0,80	2,6	58	3,6	4,8
8	490	0,28	0,7	51	2,4	3,3

Таблица 6. Парето-оптимальные значения критериев качества

F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	r ₀	ψ	λ ₁	α ₀	α _k	R _{r0}	S ₁	S ₂	H ₂
480	0,51	0,75	46	2,0	3,3	275	105	0,9	64	63	4,7	0,1	0,09	9,2
440	0,69	0,80	45	1,8	3,4	240	104	0,9	62	64	4,2	0,1	0,10	9,6

Для сравнения параллельно была проведена оптимизация градиентным методом рассматриваемых магнитных анализаторов. Для исходного варианта были взяты средние значения параметров из выбранных ранее диапазонов их изменений (см. табл. I). При этом оптимизация осуществлялась по одному критерию. Первоначально критерием было выбрано значение разрешающей способности. В результате оптимизации получено $R=456$ при $k=0,038$. Параметры оптимальной схемы приведены в первой строке таблицы 7. Как видно, при такой оптимизации существенно уменьшается коэффициент пропускания k . В результате оптимизации по комбинированному критерию $- R + 300 k$, было получено $R=408$ и $k=0,417$. Параметры этой ионно-оптической системы представлены во второй строке таблицы 7. Анализ результатов показывает, что в обоих случаях оптимизация произведена в основном за счет уменьшения размеров ширины щелей источника и приемника ионов. Поэтому была проведена

оптимизация по комбинированному критерию с фиксированными значениями размеров щелей S_1 и S_2 (по 0,1 мм). Для оптимального варианта было получено $R=400$ и $k=0,372$. Параметры оптимального варианта представлены в третьей строке таблицы 7.

Таблица 7. Значения параметров оптимальных схем

N	r_0	ψ	λ_1	α_0	α_k	R_{r0}	S_1	S_2	H_2
1	200,1	90,0	1,47	89,9	90,1	5,00	0,16	0,01	5,0
2	200,1	90,0	1,40	89,7	90,2	5,03	0,08	0,11	5,4
3	199,9	89,9	1,40	89,9	90,0	4,97	0,10	0,10	5,1

Для сравнения в таблице 8 представлены данные по магнитному масс-спектрометру МИ-1201. Как показывают результаты расчетов, характеристики данного анализатора можно улучшить. Например, в таблице 6 (вариант 1) представлены параметры схемы, которая по всем критериям качества, кроме F_5 , имеет лучшие значения, а значения F_5 равны.

Таблица 8. Характеристики МИ-1201

F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	r_0	ψ	λ_1	α_0	α_k	R_{r0}	S_1	S_2	H_2
465	0,43	0,4	26	2,0	5,6	200	90	2,0	63	116	∞	0,1	0,1	4

4. Влияние допусков на критерии качества

Решение задачи (13) гарантирует оптимальность системы лишь при выполнении равенства $x = x_1^*$, где $x_1^* \in X$, X - множество Парето. Реально всегда мы будем иметь

$$x = x_1^* + \Delta x_1, \quad (14)$$

где Δx_1 - флуктуации параметров, зависящие от x_1^* . Поэтому для

каждого x_1^* предлагается проводить анализ чувствительности критериев качества системы для $x_1 \in (x_1^* - \Delta x_1, x_1^* + \Delta x_1)$ и с учетом значений чувствительностей делать окончательный выбор оптимального варианта. Следует иметь в виду, что в случае, если допуски по параметрам не заданы жестко, их можно определять из приближенного равенства чувствительностей. Из всех вариантов выбираются те, в которых получаются технологически достижимые допуски. В качестве иллюстрации в табл. 9 и 10 представлены значения чувствительностей всех критериев качества ИОС к изменениям указанных выше параметров для двух схем (I, табл. 4 и I, табл. 6). В расчетах предполагалось, что допуски Δx_1 равны $0,01x_1^*$ ($1=1,2,\dots,9$). Значения критериев качества F_j и среднеквадратичные отклонения σ_j для таблицы 9 равны соответственно $F_1=329$, $\sigma_1=4,8$, $F_2=0,98$, $\sigma_2=0,036$, $F_3=0,30$ и $\sigma_3=0,17$. Из таблицы 9 видно, что допуски по ψ , x_k и x_0 необходимо уменьшить, а S_1 и H_2 можно изготавливать с меньшей точностью. Анализ влияния допусков для схемы 1 из таблицы 6 показал, что разрешающая способность анализатора определяется точностью установления ширин щелей S_1 и S_2 и их точность необходимо увеличить (табл. 10):

Таблица 9. Чувствительность критериев качества к изменениям параметров

Параметры	S_{1i}	S_{2i}	S_{3i}
r_0	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
ψ	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$5,4 \cdot 10^{-1}$
λ_1	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
x_0	$4,2 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$
x_k	$6,6 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$
R_{r0}/r_0	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$
S_1	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
S_2	$6,3 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$3,9 \cdot 10^{-7}$
H_2	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$

Таблица 10. Чувствительность критериев качества к изменениям параметров

Параметры	S_{1i}	S_{2i}	S_{3i}	S_{4i}	S_{5i}	S_{6i}
r_0	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
Φ	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$
λ_1	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-1}$
α_0	$7,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
α_x	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-1}$	$6,1 \cdot 10^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	$4,1 \cdot 10^{-1}$
R_{r0}/r_0	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
S_1	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
S_2	$7,5 \cdot 10^{-1}$	$8,2 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$
H_2	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод многокритериальной оптимизации ионно-оптических систем магнитных масс-анализаторов, позволяющий получить оптимальные значения параметров конструктивных элементов с учетом технологических допусков. С учетом опыта практической работы предлагается следующий алгоритм проведения оптимизации. На первом этапе анализируется влияние всех критериев качества системы к изменениям параметров. Затем оптимизация ионно-оптической системы проводится только по параметрам, сильно влияющим на характеристики системы, тем самым уменьшается число степеней свободы. Следует отметить, что для вычисления чувствительностей требуется меньшее количество точек ЛП_т-последовательностей, чем для проведения ЛП-поиска, что позволяет сократить затраты ЭВМ. На втором этапе осуществляется выбор 5-10 наилучших приближенных значений парето-оптимальных параметров. Для каждого набора параметров проводится анализ чувствительности критериев качества системы к допускам. Отбор осуществляется по значениям частичных дисперсий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Численные методы оптимизации эмиссионных электронно-оптических систем / В.П.Ильин, В.А.Катешов, Д.В.Куликов, М.А.Монастырский. Новосибирск: Наука. 1987. 192 с.
2. Non-linear optimization of cylindrical electrostatic lenses / A.Vertes, P.Juhász, L.Balazs et al. // J. Mass Spectrom. Ion Processes. 1988. Vol.84. P.255-269.
3. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука. 1981. 107 с.
4. Абрамов В.И., Карташев А.П., Рошаль А.С. Об одном методе нелинейного анализа чувствительности математических моделей // ЖЭМТФ. 1986. С.469-474.
5. Абрамов В.И., Рошаль А.С. Оптимизация электронно-оптических систем на основе нелинейного анализа чувствительности // 9-й Всесоюзный семинар по методам расчета ЭОС. Тезисы докладов.- Ташкент. 1988. С.71.
6. Губин А.В. Пакет прикладных программ для моделирования масс-анализаторов со скрещенными полями // Тезисы докладов I Всесоюзного научно-технического совещания "Разработка и применение специализированных масс-спектрометрических установок". М., 1983. С.171.
7. Сисоев А.А., Самсонов Г.А. Теория и расчет статических масс-анализаторов. М.: МИФИ. 1972. Ч.1. 172с.
8. Минимизация в инженерных расчетах на ЭВМ / Гуснин С.Д., Омелянов Г.А., Резников Г.В., Сироткин В.С. М.: Машиностроение. 1981. 121с.