электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 535.317

Аберрационный синтез лазерных оптических систем

Минахметов А.С., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектроника и лазерная техника»

Научный руководитель: Ширанков А.Ф., к.т.н., начальник отдела НИИ «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
ashirankov@bmstu.ru

Введение

При осуществлении аберрационного синтеза оптических систем, предназначенных для преобразования параметров лазерного излучения, необходимо учитывать, что излучение описывается параметрами гауссова пучка, который представляет собой волну, отличную как от сферической, так и от плоской; огибающая гауссова пучка по уровню амплитуды 1/e представляет собой гиперболоид вращения. (Рис. 1) [1].

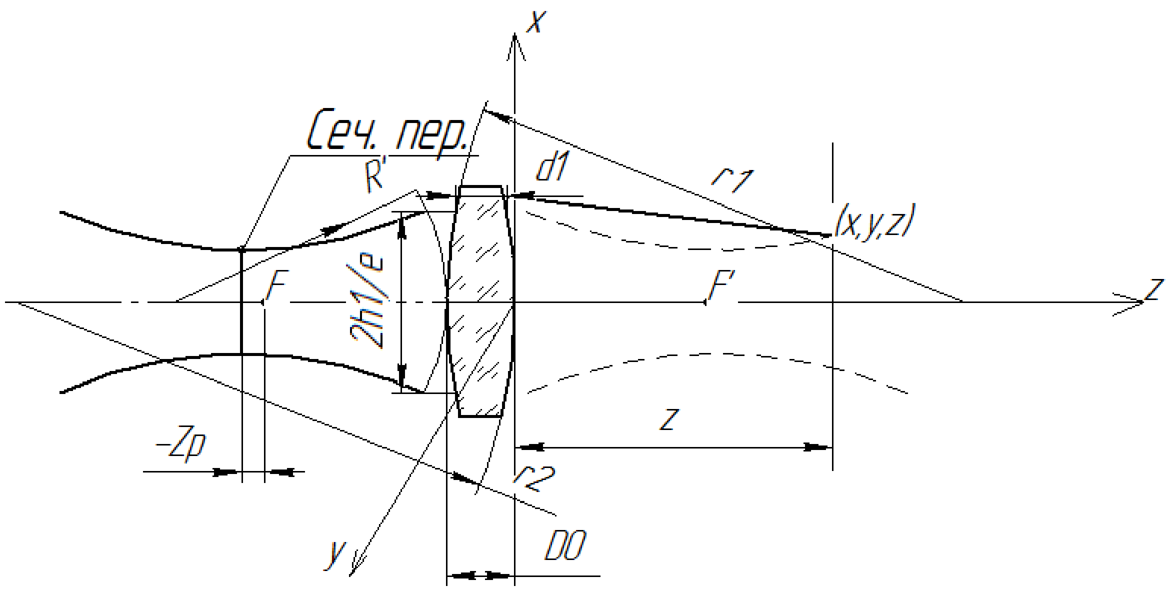

Рис. 1. Преобразование гауссова пучка линзой

Для выявления аберраций, вносимых линзой в гауссов пучок, стоит рассмотреть экспоненциальный множитель подынтегрального выражения дифракционного интеграла. Поле $\psi(x, y, z)$ в произвольной точке пространства после тонкой линзы с координатами (x, y, z) в соответствии со скалярной теорией дифракции определяется путём вычисления дифракционного интеграла 1 [1].

$$\psi(x,y,z)=\frac{iA(z')}{\lambda z}e^{-ikz}\iint exp\{-(ax'^2+b_x x'+c_x\}exp\{-\big(ay'^2+b_y y'+$$

+cyexpik2f′ωΣT8ρhmax8+βΣhmax6+2ωΣhmax8T6ρ+αΣ+1,5βΣhmax2++1,75ωΣhma x4·(h4−h2hmax2+hmax48)T4ρdx′dy′(1)

где:

λ – длина волны лазерного излучения, k - волновое число, i – мнимая единица, $A(z)$ – распределение амплитуды поля в точке z на оптической оси

$\alpha_\Sigma=\alpha+\frac{2f'}{8z^3},\beta_\Sigma=\beta+\frac{2f'}{16z^5},\omega_\Sigma=\omega+\frac{5f'}{64z^7}$ – суммарные параметры искажения поля, где

z – продольная координата плоскости анализа

f′ – фокусное расстояние линзы

$$\alpha=\frac{1}{4}\frac{\frac{1}{r_1^3}-\frac{1}{r_2^3}}{\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}};\ \beta=\frac{1}{8}\frac{\frac{1}{r_1^5}-\frac{1}{r_2^5}}{\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}};\ \omega=\frac{5}{64}\frac{\frac{1}{r_1^7}-\frac{1}{r_2^7}}{\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}}$$ – параметры искажения

r_1,r_2 – радиусы поверхностей линзы

Параметр a определяется как:

$$a=\left[\frac{1}{h_{\frac{1}{e}}^2}-\frac{a_\lambda}{2f'(n_\lambda-1)}\right]+\frac{ki}{2}\left[\frac{1}{R'}+\frac{1}{z}-\frac{1}{f'}-\frac{h_{max}^2}{f'}\left(\frac{7}{8}\omega_\Sigma h_{max}^4+\frac{15}{16}\beta_\Sigma h_{max}^2+\alpha_\Sigma\right)\right]$$, где

$h_{\frac{1}{e}}$ – радиус пятна лазерного излучения по уровню 1/e в плоскости, перпендикулярной оси z и касательной к первой поверхности линзы, h_{max} – максимальный радиус пятна лазерного излучения по уровню 1/e в линзе, R' - радиус кривизны волнового фронта в точке (0,0,z’), n_λ - показатель преломления стекла линзы на длине волны λ, a_λ - спектральный коэффициент поглощения излучения стеклом линзы на длине волны λ.

Параметры b и c определяются как: $b_x=-\frac{kx}{z}i;\ b_y=-\frac{ky}{z}i;\ c_x=\frac{kx^2}{2z}i;\ c_y=\frac{ky^2}{2z}i;$

$T_4(\rho)=\rho^4-\rho^2+\frac{1}{8},T_6(\rho)=\rho^6-1{,}5\rho^4+\frac{9}{16}\rho^2-\frac{1}{32};$ $T_8(\rho)=\rho^8-2\rho^6+1.25\rho^4-0.25\rho^2+\frac{1}{128};$ – полиномы Чебышева, наименее уклоняющиеся от нуля в промежутке$[-1;+1]$, содержащие параметры: $\rho=\frac{h}{h_{max}},h=\sqrt{z^2+(x'-x)^2+(y'-y)^2}$

Описанный математический аппарат позволяет проанализировать аберрации, вносимые линзой, а так же определить путь синтеза реальных оптических компонентов с наименьшими аберрациями.

Определение кривизн поверхностей компонента.

Предлагается рассмотреть преобразование излучения компонентом, состоящим из двух линз, с помощью которых возможно скорректировать аберрации до 7-го порядка. Экспоненциальный множитель подынтегрального выражения дифракционного интеграла возможно представить в виде[2.1]:

$$\varphi = \frac{k}{2f'}\left(\alpha_\Sigma + 1,5\beta_\Sigma h_{\max}^2 + 1,75\omega_\Sigma h_{\max}^4\right) h_{\max}^4 T_4(\rho),$$

где коэффициенты:

f' – фокусное расстояние компонента (фокусное расстояние компонента f' берется из габаритного расчета);

$h^2 = x^2 + y^2$; $h_{\max}$ – максимальный размер пучка на компоненте;

$T_4\left(\rho = h/h_{\max}\right) = \rho^4 - \rho^2 + 1/8$ – полином Чебышева, наименее уклоняющийся от нуля в промежутке $[-1;+1]$;

$\alpha_\Sigma, \beta_\Sigma, \omega_\Sigma$ – параметры, характеризующие аберрации ЛОС 3, 5 и 7-го порядков[2.2]:

$$\alpha_\Sigma = \alpha + \frac{f'}{4z^3}\ ;\ \beta_\Sigma = \beta - \frac{f'}{8z^5}\ ;\ \omega_\Sigma = \omega + \frac{5f'}{64z^3}\ ;$$

$$\alpha = \alpha_1\Phi_1 f' + \alpha_2\Phi_2 f';\ \alpha_1 = \frac{1}{4}\frac{\rho_1^3 - \rho_2^3}{\rho_1 - \rho_2};\ \alpha_2 = \frac{1}{4}\frac{\rho_3^3 - \rho_4^3}{\rho_3 - \rho_4};$$

$$\beta = \beta_1\Phi_1 f' + \beta_2\Phi_2 f'\ ;\ \beta_1 = \frac{1}{8}\frac{\rho_1^5 - \rho_2^5}{\rho_1 - \rho_2};\ \beta_2 = \frac{1}{8}\frac{\rho_3^5 - \rho_4^5}{\rho_3 - \rho_4};$$

$$\omega = \omega_1\Phi_1 f' + \omega_2\Phi_2 f';\ \omega_1 = \frac{5}{64}\frac{\rho_1^7 - \rho_2^7}{\rho_3 - \rho_4};\ \omega_2 = \frac{5}{64}\frac{\rho_3^7 - \rho_4^7}{\rho_3 - \rho_4};$$

$\Phi_1 = (n_1 - 1)(\rho_1 - \rho_2)$ – оптическая сила первой линзы компонента;

$\Phi_2 = (n_2 - 1)(\rho_3 - \rho_4)$ – оптическая сила второй линзы компонента;

$\rho_j = 1/r_j$ – кривизна преломляющей поверхности компонента $j = \overline{1,4}$;

r_j – радиус кривизны поверхностей компонента;

n_1, n_2 – показатели преломления линз компонента.

Условие устранения аберраций компонента 3-го порядка эквивалентно $\alpha_\Sigma = 0$. При этом необходимо обеспечить заданное фокусное расстояние компонента f', что через оптические силы линз компонента представляется как $f'^{-1} = \Phi_1 + \Phi_2$.

В случае, когда компонент представляет собой склейку двух линз, параметры $\rho_2 = \rho_3 = p$ равны между собой в виду сопряженности второй поверхности первой линзы и первой поверхности второй линзы. В данном случае α_Σ представляется как:

$$\alpha_\Sigma = \frac{1}{4}\frac{\rho_1^3 - p^3}{\rho_1 - p}(n_1 - 1)(\rho_1 - p)f' + \frac{1}{4}\frac{p^3 - \rho_4^3}{p - \rho_4}(n_2 - 1)(p - \rho_4)f' + \frac{f'}{4z^3}$$

Приведённое выше выражение должно обнуляться при исправлении аберраций 3-го порядка, в связи с чем получаем основное уравнение аберрационного синтеза:

$$\frac{1}{4}\frac{\rho_1^3-p^3}{\rho_1-p}(n_1 - 1)(\rho_1 - p)f' + \frac{1}{4}\frac{p^3-\rho_4^3}{p-\rho_4}(n_2 - 1)(p - \rho_4)f' + \frac{f'}{4z^3} = 0 \ (2)$$

Введя новые переменные $y = \frac{\rho_1}{p} - 1$, $x = \frac{\rho_4}{p},\ m = \frac{f'}{z}$, придем к следующему виду уравнения (2).

$$(y^3 + 3y^2 + 3y)(n_1 - 1) + (1 - x^3)(n_2 - 1){f'}^3 + \frac{m^3}{p^3 {f'}^3} = 0 \ (3)$$

Зная условие обеспечения сохранения фокусного расстояния компонента: $\frac{1}{f'} = \Phi_1 + \Phi_2$ Возможно записать свободный член уравнения (3) $\frac{m^3}{p^3 {f'}^3}$ через переменные x и y как

$$\frac{m^3}{p^3 {f'}^3} = m^3\big((n_1 - 1)y + (n_2 - 1)(1 - x)\big)^3$$

Уравнение (3) при данных преобразованиях примет следующий вид:

$$(y^3 + 3y^2 + 4y)(n_1 - 1) + (1 - x^3)(n_2 - 1) + m^3\big((n_1 - 1)y + (n_2 - 1)(1 - x)\big)^3 = 0$$

Обозначив $a = (1 - x^3)(n_2 - 1);\ n_{11} = n_1 - 1;\ b = (n_2 - 1)(1 - x)$ возможно получить следующее кубическое уравнение, решаемое относительно переменной y:

$$n_{11}(1 + m^3 n_{11}^2) \cdot y^3 + 3n_{11}(1 + n_{11} b m^3) \cdot y^2 + 3n_{11}(1 + m^3 b) \cdot y + (a + b^3 m^3) = 0 \ (4)$$

Это уравнение имеет, по крайней мере, один действительный корень y. Задавая и варьируя неопределённые коэффициент x и m, возможно получить различные решения кубического уравнения для последующей селекции наилучшего. По каждому корню уравнения получаются конструктивные параметры 2-х линзового объектива:

$$\begin{cases} r_2 = f'[(n_1 - 1)y + b] \\ r_1 = r_2/(y + 1) \\ r_4 = r_2/x \\ r_3 = r_4 \end{cases}$$

Полные диаметры компонентов

По световому диаметру компонента D_C из таблицы для соответствующей строки [3] определяются ΔD, d_{KR} и полный диаметр линз D_P, которые используются далее для расчета. Причем полный диаметр равен $D_P = D_C + \Delta D$. Световые диаметры D_C компонентов берутся из габаритного расчета компонента.

Таблица 1

Полные диаметры компонентов

D_C, мм	ΔD, мм	d_{KR}, мм ($f' > 0$)
< 6	0,6	1,0
$\geq 6 < 10$	1,0	1,2
$\geq 10 < 18$	1,5	1,5
$\geq 18 < 30$	1,8	1,8
$\geq 30 < 50$	2,0	2,0
$\geq 50 < 80$	2,5	2,5
$\geq 80 < 120$	3,0	3,0

Расчет толщин линз

Расчет толщины линз является следующим важным этапом аберрационного синтеза. Её можно определить, зная радиусы кривизны поверхностей и полный диаметр линзы.

Для начала необходимо определить стрелку прогиба S_i для каждой из поверхностей:

$$S_i = r_i\left(1 - \sqrt{1 - (\rho_i h)^2}\right), \text{где}$$

r_i − радиус кривизны сферической поверхности

ρ − кривизна поверхности

h − высота, на которой определяется стрелка

Для линзы с f’>0 толщина d по оси определяется по формуле:

$$d = d_{\text{кр}} + S_1 - S_2, \text{где}$$

S_1 − стрелка прогиба первой поверхности линзы

S_2 — стрелка прогиба второй поверхнсоти линзы

$d_{кр}$ — толщина линзы по краю

Для линзы с f'<0 толщина d по оси определяется по формуле:

$$d = 0.06\,D_p, \text{где}$$

$$D_p - \text{полный диаметр линзы}$$

Случай, когда $|n_1 - n_2| < 0{,}00001$, где n_1, n_2 – показатели преломления входящих в компонент линз:

$d_{I\ линзы} = 0{,}5(d_{кр} + S_1 - S_2)$

$Если\ \rho_1 < \rho_2, \text{то}\ d_{II\ линзы} = 0{,}025 D_p$

$Если\ \rho_1 \geq \rho_2, \text{то}\ d_{II\ линзы} = d_{I\ линзы}$

$$d_{компонента} = d_{I\ линзы} + d_{II\ линзы}$$

Случай, когда $|n_1 - n_2| \geq 0{,}00001$

$Если\ \rho_1 \geq \rho_2,\ то\ d_{I\ линзы} = d_{кр} + S_1 - S_2$

$Если\ 8d_{кр} + d_{I\ линзы} < D_p\ ,то\ d_{I\ линзы} = 0{,}125(D_p + 8S_1 - 8S_2);$

$Если\ \rho_1 < \rho_2,\ то\ d_{I\ линзы} = 0{,}12 D_p\ \text{и}\ d_{кр} = d_{I\ линзы} - S_1 + S_2$

$Если\ 3d_{кр} + 8d_{I\ линзы} < D_p,\ то\ d_{I\ линзы} = 0{,}125(D_p + 8S_1 - 8S_2);$

$Если\ \rho_3 \geq \rho_4,\ то\ d_{II\ линзы} = d_{кр} + S_3 - S_4$

$Если\ 8d_{кр} + d_{II\ линзы} < D_p\ ,то\ d_{II\ линзы} = 0{,}125(D_p + 8S_3 - 8S_4);$

$Если\ \rho_4 < \rho_4,\ то\ d_{II\ линзы} = 0{,}12 D_p\ \text{и}\ d_{кр} = d_{II\ линзы} - S_3 + S_4$

$Если\ 3d_{кр} + 8d_{II\ линзы} < D_p,\ то\ d_{II\ линзы} = 0{,}125(D_p + 8S_3 - 8S_4);$

$$d_{компонента} = d_{I\ линзы} + d_{II\ линзы} + d_{кр}$$

Расчёт кардинальных отрезков и точек

Следующим шагом в аберрационном синтезе идет определение кардинальных отрезков и точек.

Фокусное расстояние линзы[4]:

$$f' = \frac{n r_1 r_2}{(n-1)[n(r_2 - r_1) + d(n-1)]}$$

Положение фокальных плоскостей[4]:

$$S_F = -f'\left(1 + \frac{n-1}{n}\frac{d}{r_2}\right);\ S'_{F'} = f'\left(1 + \frac{n-1}{n}\frac{d}{r_2}\right)$$

Положение главных плоскостей:[4]

$$S_H = -f'\frac{n-1}{n}\frac{d}{r_2};\ \ S'_H = -f'\frac{n-1}{n}\frac{d}{r_2};$$

Редуцирование компонента

При переходе от тонкого компонента к толстому «плывут» фокусные расстояния компонента. Для того чтобы, фокусное расстояние компонента оставалось прежним, выполняется процедура редуцирования, при которой радиусы кривизны и толщины компонента умножаются на коэффициент редуцирования.

Фокусное расстояние синтезированного компонента:

$$\mathrm{f}_{\text{компонента}-\text{аберрационный синтез}} = \frac{\mathrm{f}^2_{\mathrm{I}\ \text{линзы}} \cdot \mathrm{f}^2_{\mathrm{II}\ \text{линзы}}}{\mathrm{f}_{\mathrm{I}\ \text{линзы}} + \mathrm{f}_{2\ \text{линзы}} - \mathrm{d}_{\text{кр}}}$$

Коэффициент редуцирования:

$$\mathrm{A}_{\text{ред}} = \frac{\mathrm{f}_{\text{компонента}-\text{габаритный синтез}}}{\mathrm{f}_{\text{компонента}-\text{аберрационный синтез}}}$$

Проведя редуцирование компонента, снова высчитывается фокусное расстояние компонента.

Реализация алгоритма аберрационного синтеза

Анализ аберраций рекомендуется проводить при помощи расчёта хода лучей лучевого пакета для синтезированной части ЛОС – от входной перетяжки всей ЛОС до выходной перетяжки после текущего компонента.

Анализ аберраций в данной работе не рассматривается. Практически любой синтезированный толстый компонент уже считается избавленным от большинства аберраций, но для выбора лучшего варианта аберрационного синтеза, необходимо проводить полный анализ аберраций и выбирать лучший вариант.

При реализации алгоритма аберрационного синтеза необходимо задавать входные параметры, не заданные или являющиеся выходными при габаритном синтезе параметры:

$$\mathrm{n}_{1\_\mathrm{I}} - \text{показатель преломления первой линзы первого компонента}$$

$$\mathrm{n}_{2\_\mathrm{I}} - \text{показатель преломления второй линзы первого компонента}$$

$$\mathrm{n}_{1\_\mathrm{II}} - \text{показатель преломления первой линзы второго компонента}$$

$$\mathrm{n}_{2\_\mathrm{II}} - \text{показатель преломления второй линзы второго компонента}$$

$$\mathrm{f}'_{\mathrm{I}} - \text{фокусное расстояние первого компонента}$$

$$\mathrm{f}'_{\mathrm{II}} - \text{фокусное расстояние второго компонента}$$

$$\mathrm{m} - \text{неопределённый коэффициент, просчитывается в интервале } [-5{,}5]$$

$$\mathrm{x}_4 - \text{неопределённый коэффициент, просчитывается в интервале } [-1{,}1]$$

h – шаг с которым просчитываются неопределённые коэффициенты

Алгоритма аберрационного синтеза

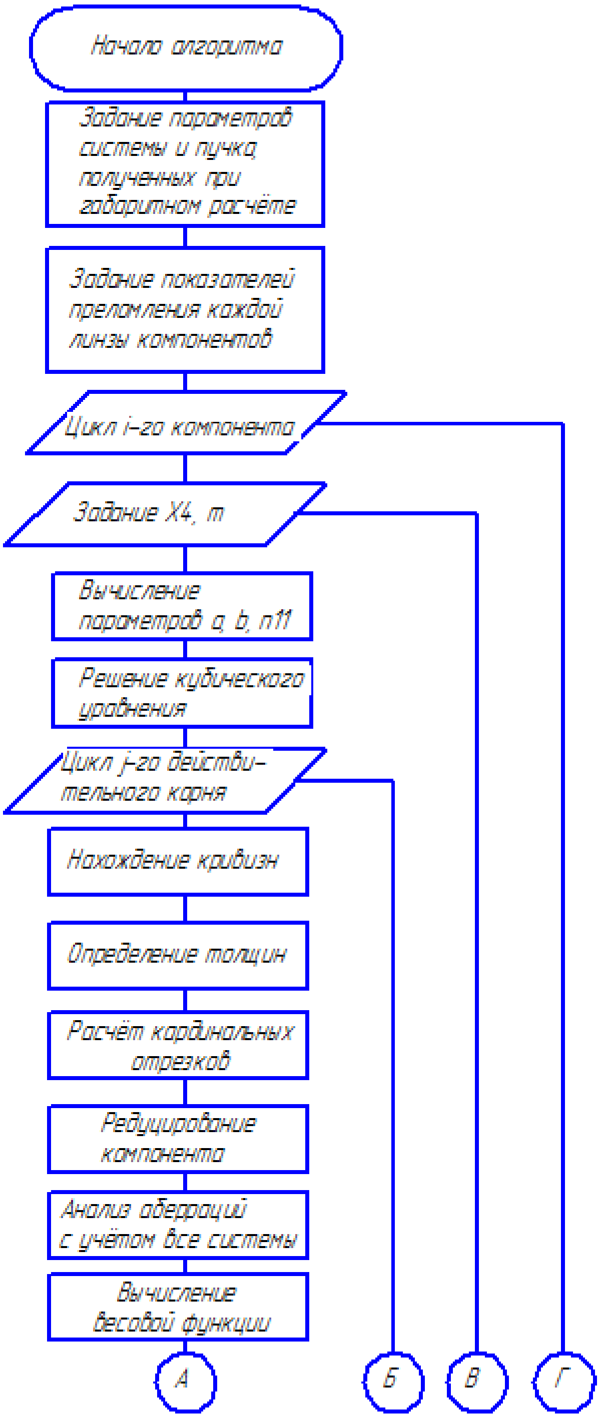

Рис. 2а. Схема алгоритма аберрационного синтеза

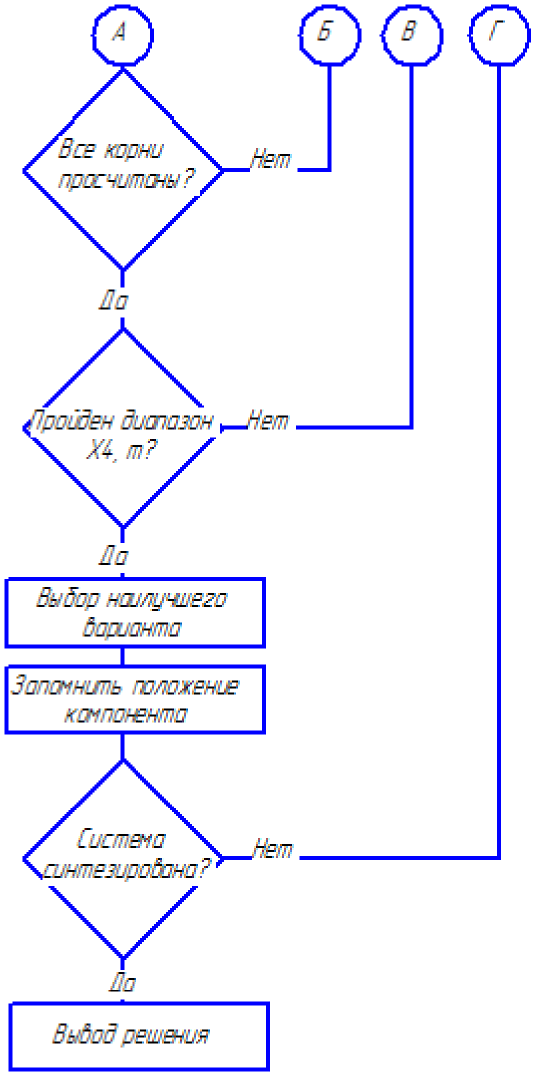

Рис. 2б. Схема алгоритма аберрационного синтеза

На основе приведенного в данной работе математического аппарата был разработан алгоритм аберрационного синтеза многокомпонентных лазерных оптических систем. Данный алгоритм был применен в разработке программного обеспечения аберрационного синтеза. Разработанная программа дала возможность синтезировать высококачественные лазерные оптические системы, в частности оптическую систему «летучая оптика», применяемой в лазерных гравировщиках.

Список литературы

1. Пахомов И.И. Расчет преобразования лазерного пучка в оптических системах. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 53 с.
2. Носов П.А., Пахомов И.И., Ширанков А.Ф. Состояние и перспективы развития методов расчета преобразования лазерного излучения оптическими системами // Инженерный журнал: наука и инновации. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. №9. Режим доступа: http://engjournal.ru/articles/363/363.pdf (дата обращения 05.09.2014).
3. Толстоба Н.Д., Цуканов А.А. Проектирование узлов оптических приборов. Учебное пособие. СПб.: Санкт-Петербургский Государственный Институт Точной Механики и Оптики (Технический Университет), 2002. 129 с.
4. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем (изд. 3-е). М.: Машиностроение, 1992. 488 с.