

УДК 535.317

Габаритный синтез оптических систем лазерных головок с перемещением выходной перетяжки постоянного размера

*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*

Лазерные оптические системы с непрерывным перемещением выходной перетяжки могут найти применение в разных областях обработки материалов – лазерная резка, сварка, гравировка. Принципиальным преимуществом применения таких лазерных оптических систем является метод доставки излучения на рабочую поверхность. Благодаря сохранению размера выходной перетяжки и её перемещению возможно точно сфокусировать лазерное излучение практически в любой точке обрабатываемого материала. Данной возможности лишено большинство лазерных оптических систем, используемых, в частности, в устройствах для лазерной гравировки. Такие лазерные оптические системы не фокусируют выходную перетяжку во всех точках обрабатываемой поверхности, а лишь обеспечивают направление оси лазерного излучения в необходимую точку, что сказывается на точности выполненной технологической операции. Пример работы таких систем приведен на рис.1. Некоторые оптические системы могут обеспечивать фокусировку лазерного излучения в любой точке обрабатываемой поверхности, но не обеспечивают постоянный размер пятна излучения, что опять же сказывается на точности обработки.

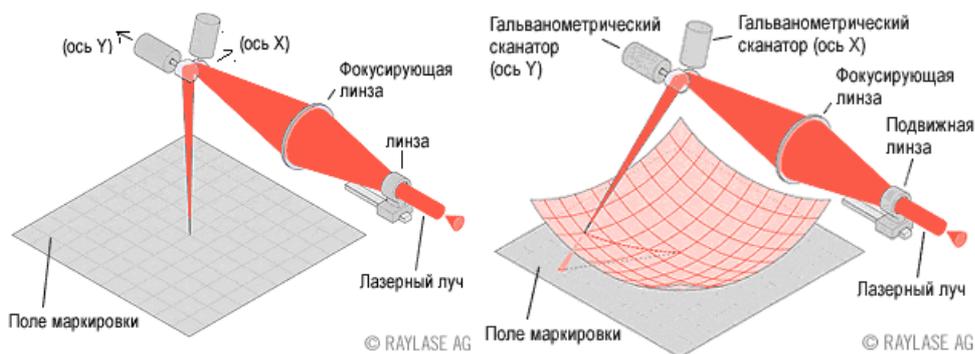


Рис. 1. Методы доставки излучения на рабочую поверхность

Обоснование возможности разработки оптической системы для непрерывного перемещения выходной перетяжки постоянного размера

Предлагается к рассмотрению однокомпонентная лазерная оптическая система. В качестве исходных параметров имеем: λ – основная длина волны лазерного излучения (ЛИ), z_k – конфокальный параметр ЛИ, h_p – полудиаметр исходной перетяжки, θ – полурасходимость пучка, параметр качества M^2 . Конструктивные параметры однокомпонентной системы: f' – фокусное расстояние, z_p – смещение плоскости перетяжки входного пучка относительно переднего фокуса. Соответствующие параметры представлены на рис. 2.

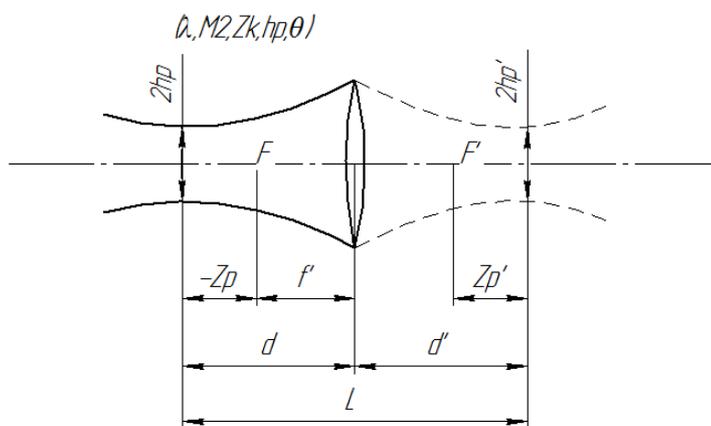


Рис. 2. Однокомпонентная система

Продольное увеличение α системы определяется [1]: $\alpha = \frac{f'^2}{z_k^2 + z_p^2}$. Этот параметр позволяет определить выходные характеристики преобразованного лазерного излучения

$$\begin{aligned}
 z_p' &= -\alpha z_p \\
 z_k' &= \alpha z_k \\
 h_p' &= h_p \sqrt{\alpha} \\
 \theta' &= \theta \sqrt{\alpha}
 \end{aligned}$$

Размер выходной перетяжки h'_p зависит от параметра $\alpha = \frac{f'^2}{z_k^2 + z_p^2}$, который в свою очередь в готовой системе зависит только от переменной z_p , так как параметры f' и z_k неизменны. Таким образом, возможно прийти к выводу, что величина h'_p задается функцией одного переменного $h'_p = F(z_p)$. Вид функции позволяет сделать вывод, что переместить перетяжку, изменив длину системы, не меняя параметр z_p и сохраняя постоянство h'_p невозможно. Задача перемещения выходной перетяжки при сохранении её размера в однокомпонентной системе нереализуема.

Предлагается к рассмотрению двухкомпонентная лазерная оптическая система.

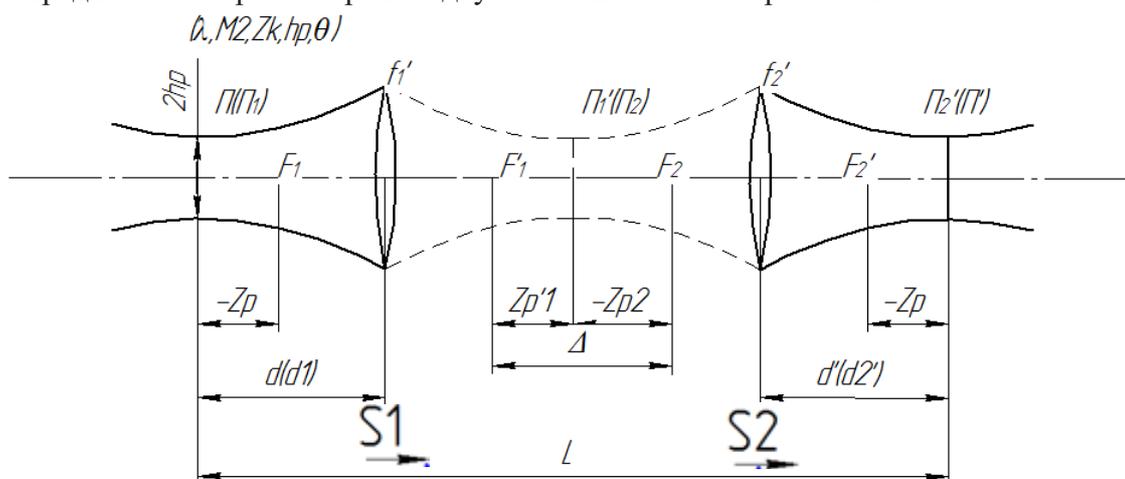


Рис. 3 Двухкомпонентная система

Основные конструктивные параметры такой системы:

f'_1 – фокусное расстояние первого компонента

f'_2 – фокусное расстояние второго компонента

z_p – расстояние от исходной перетяжки до переднего фокуса первого компонента

Δ – расстояние между задним фокусом первого компонента и передним второго

Для определения h'_p необходимо провести расчет покомпонентно. Преобразование пучка первым компонентом:

$$\alpha_1 = \frac{f_1'^2}{z_k^2 + z_{p1}^2}$$

$$z'_{p1} = -\alpha_1 z_{p1}$$

$$z'_{k1} = -\alpha_1 z_{k1}$$

Вторым компонентом:

$$-z_{p2} = \Delta - z'_{p1}$$

$$\alpha_2 = \frac{f_2^2}{z_{k1}^2 + z_{p2}^2}$$

Продольное увеличение второго компонента возможно записать в виде:

$$\alpha_2 = \frac{f_1^2}{(\alpha_1 z_k)^2 + (\alpha_1 z_p + \Delta)^2}$$

Полное продольное увеличение двухкомпонентной системы α определяется как:

$$\alpha = \alpha_1 \alpha_2 = \frac{f_1^2 f_2^2}{\Delta^2 z_k^2 + (\Delta \cdot z_p + f_1^2)^2} = \frac{\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2}{\frac{\Delta^2(z_k^2 + z_p^2)}{f_1^4} + \frac{2\Delta \cdot z_p}{f_1^2} + 1}$$

Выполнив аналитические преобразования над формулой расчета продольного увеличения возможно получить:

$$\alpha = \frac{(f_2'/f_1')^2}{P(\Delta, z_p)}, \text{ где}$$

$$P(\Delta, z_p) = \frac{\Delta^2(z_k^2 + z_p^2)}{f_1^4} + \frac{2\Delta \cdot z_p}{f_1^2} + 1$$

$P(\Delta, z_p)$ – полином, зависящий от двух переменных Δ, z_p . Таким образом, размер выходной перетяжки двухкомпонентной системы ($h_p' = h_p \sqrt{\alpha}$) зависит от переменных Δ, z_p . Полу диаметр выходной перетяжки определяется функцией от двух переменных:

$$h_p' = F(\Delta, z_p)$$

Представляется возможным менять размер выходной перетяжки, меняя расстояние от исходной перетяжки до переднего фокуса первого компонента и расстояние между задним фокусом первого компонента и передним второму. Возможно менять эти параметры так, чтобы размер выходной перетяжки оставался неизменным:

$$F(\Delta, z_p) = const$$

Используя условие постоянства функции $F(\Delta, z_p)$ возможно определить зависимость Δ от z_p или z_p от Δ , при которых изменяется длина лазерной оптической системы. Изменение длины системы говорит о изменении положения выходной перетяжки. Соответствующая $F(\Delta, z_p) = const$ зависимость $\Delta(z_p)$ или $z_p(\Delta)$ позволяет сохранить постоянным размер выходной перетяжки. В итоге возможно прийти к выводу, что двухкомпонентные системы позволяют изменить длину системы, изменив положение выходной перетяжки, сохранив её размер.

В общем случае в этой системе может быть реальная промежуточная перетяжка, что крайне нежелательно, так как в замкнутом пространстве скапливается много энергии, в результате чего может сильно нагреваться корпус, а также может произойти возгорание пылинок. В виду данной проблемы рекомендуется разрабатывать систему такой, чтобы промежуточная перетяжка всегда оставалась мнимой. Для этого необходимо, чтобы всегда выполнялось условие: $d_2 < z'_{p1} + f'_1$, где d_2 – расстояние между компонентами. Конструкция такой системы представлена на рис. 4

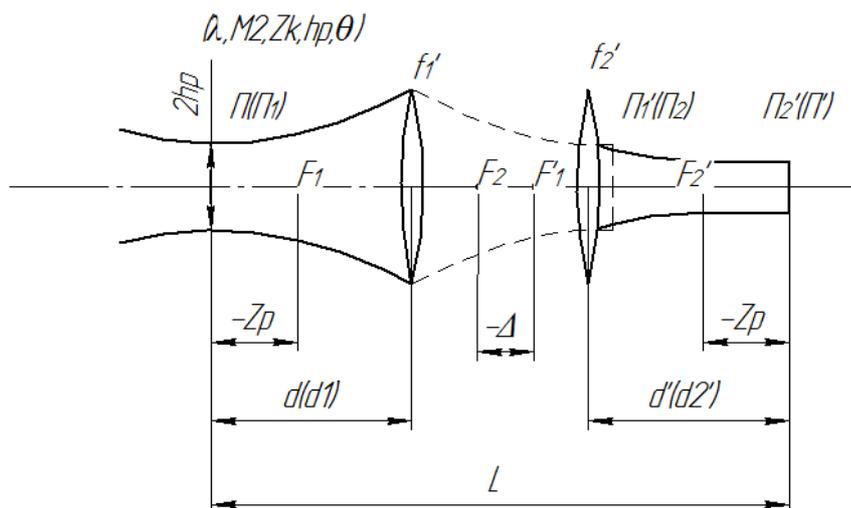


Рис. 4. Конструкция лазерной оптической системы

Анализ функции $P(\Delta, z_p)$

Сохранение постоянства выходной перетяжки обеспечивается постоянством выражения $h_p \sqrt{\alpha}$. Размер входной перетяжки постоянен, и изменять его невозможно.

$h_p \sqrt{\alpha} = const$ тогда и только тогда, когда продольное увеличение α постоянно.

Параметр α сохраняет своё значение только если $\frac{(f'_2/f'_1)^2}{P(\Delta, z_p)} = const$, а в свою очередь значения фокусов f'_2 и f'_1 не могут изменяться во время работы лазера, поэтому возникает условие:

$$P(\Delta, z_p) = const$$

Функция $P(\Delta, z_p)$ образует трёхмерную поверхность, точки которой охватывают всевозможные положения определенных компонентов системы.

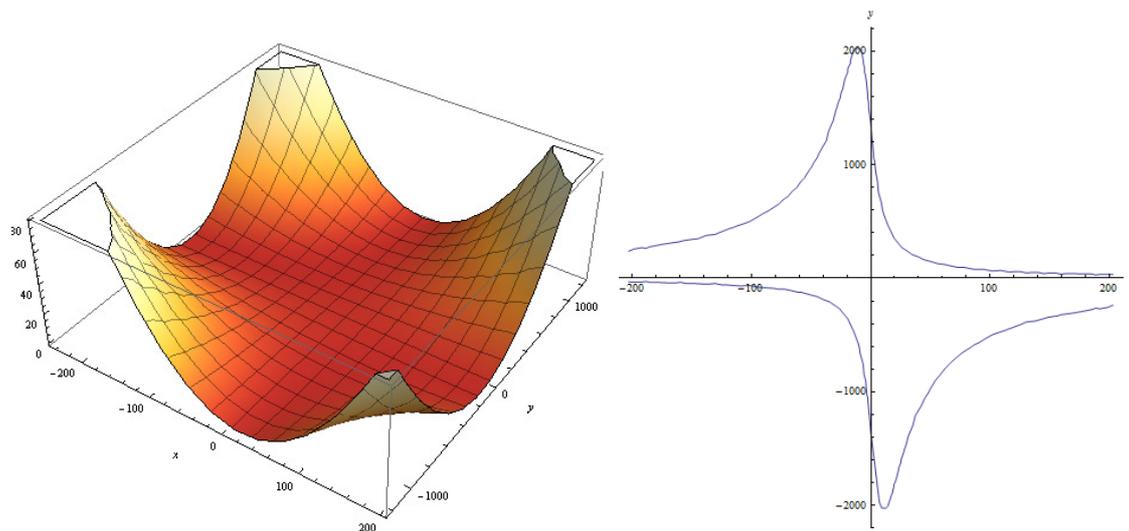


Рис. 5 Пример формы поверхности функции $P(\Delta, z_p)$ и форма кривой в сечении $P=\text{const}$

Если взять сечение в какой либо плоскости перпендикулярной оси P , то в нём получим геометрическое место точек, характеризующие все возможные положения компонентов, при которых размер выходной перетяжки неизменен, но длина лазерной оптической системы переменна. Таким образом, условие $P(\Delta, z_p) = \text{const}$ выполняется, когда компоненты занимают положения в соответствии с определёнными точками на линиях в полученном сечении. Форма таких линий возможна разная. Общий вид такого места точек дан на рис. 6

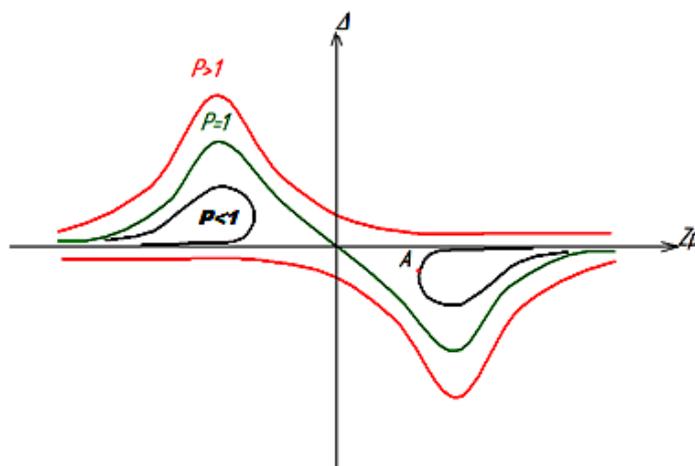


Рис. 6. Характер зависимостей $\Delta(z_p)$ при различном значении $P(\Delta, z_p)$

Для функции $P(\Delta, z_p)$ всегда верно $P(\Delta, z_p) > 0$, но в зависимости от того $P=1$, $P<1$ или $P>1$ форма в сечении разная. Точка A – точка стационарности полинома $P(\Delta, z_p)$. Для неё верно[2]:

$$P = \frac{z_k^2}{z_k^2 + z_p^2} \rightarrow \frac{1}{P} = 1 + \frac{z_p^2}{z_k^2}$$

$$z_p(A) = \pm z_k \sqrt{\frac{1-P}{P}} \rightarrow \Delta(A) = \mp \alpha_1 z_k \sqrt{\frac{1-P}{P}}$$

Если уровень функции $P(\Delta, z_p) < 1$, то рекомендуется начинать расчет габаритных параметров системы с точки А .

Габаритный расчет оптической системы в частном положении компонентов системы.

Зная фокусы компонентов, параметры излучения лазера, требуемый размер выходной перетяжки, пару (Δ, z_p) возможно определить все габаритные параметры системы в положении, задаваемом переменными (Δ, z_p) [1,2,3].

- Дефокусировка выходной перетяжки после первого компонента

$$z'_{p1} = -\frac{f_1'^2}{z_k^2 + z_p^2} \cdot z_p$$

- Расстояние между исходной перетяжкой и первым компонентом

$$d_1 = f_1' - z_p$$

- Расстояние между компонентами

$$d_2 = f_1' + f_2' + \Delta$$

- Дефокусировка выходной перетяжки после второго компонента

$$z'_p = \alpha \cdot \left(z_p + \Delta \cdot \frac{z_k^2 + z_p^2}{f_1'^2} \right)$$

- Расстояние между вторым компонентом и выходной перетяжкой

$$d_3 = f_2' + z'_p$$

- Длина всей системы

$$L = 2 \cdot (f_1' + f_2') - z_p + \Delta + z'_p$$

- Световой диаметр первого компонента

$$D_{CB1} = 2 \cdot K_d \cdot h_p \cdot \sqrt{1 + \frac{d_1^2}{z_k^2}}$$

- Диафрагменное число первого компонента

$$N_{d1} = \frac{f_1'}{D_{CB1}}$$

- Световой диаметр второго компонента

$$D_{CB2} = 2 \cdot K_d \cdot \sqrt{\alpha} \cdot h_p \cdot \sqrt{1 + \frac{d_2^2}{z_k^2}}$$

- Диафрагменное число второго компонента

$$N_{d2} = \frac{f_2'}{D_{CB2}}$$

- Размер выходной перетяжки

$$h'_p = h_p \sqrt{\alpha}$$

- Конфокальный параметр преобразованного пучка

$$z'_k = z_k \alpha$$

- Угловая расходимость преобразованного пучка

$$\theta' = \theta(\sqrt{\alpha})^{-1}$$

Исследовав зависимость длины системы L от двух переменных Δ и z_p , возможно утверждать, что зависимость длины системы L только от переменных (Δ, z_p) имеет место быть. Изменение длины системы фактически означает перемещение положения выходной перетяжки. Постоянство её размера обеспечивается заданием (Δ, z_p) из геометрического места точек, определяемого уровнем функции P (рис. 6). Уровень функции P однозначно определяется размером исходной перетяжки h_p , требуемым размером выходной перетяжки h'_p и фокусами компонентов f'_1, f'_2 .

Описание алгоритма габаритного расчета ЛОС

Определение фокусов компонентов является одной из основных задач габаритного синтеза. Одним из вариантов определения фокусов является перебор большого интервала фокусов. В качестве выходных параметров необходимо получить крайние и промежуточные положения оптических компонентов, при которых возможно выполнить абберрационный синтез, создав условия к получению оптической системы высокого качества.

Для начала необходимо определить и задать параметры:

z_k – конфокальный параметр

h_p – размер исходной перетяжки

h'_p – требуемы размер выходной перетяжки

$[f'_{1min}, f'_{1max}]$ – интервал поиска фокуса первого компонента

$[f'_{2min}, f'_{2max}]$ – интервал поиска фокуса второго компонента

δz_p – дельта по параметру z_p

K – количество разбиений промежутка z_p

N – количество разбиений интервалов f'_1 и f'_2

Одной паре f'_1 и f'_2 соответствует большое количество решений. Для определения наилучшего решения вводится оценка полученных систем посредством оценочной функции.

$$F = P_1 \cdot \frac{1}{N_{dmin}} \cdot \frac{1}{M_1} + P_2 \cdot \frac{D_{свmax}}{M_2}, \text{ где}$$

P_1, P_2 – веса оценочной функции, а M_1 и M_2 – коэффициенты масштаба оценочной функции. Аргументы оценочной функции: $\frac{1}{N_{dmin}}$ – максимальное значение апертуры

системы и $D_{свтаx}$ – максимальный световой диаметр, достигаемый в системе. Минимальные значения этих аргументов обеспечивает наилучший результат абберационного синтеза.

Предлагается следующий алгоритм расчета оптической системы (рис. 8) на основе которого была создана программа для габаритного синтеза двухкомпонентных лазерных оптических систем (ЛОС) с непрерывным перемещением выходной перетяжки.

Закон перемещения компонентов

Пусть S_1 – перемещение первого компонента, S_2 – перемещение второго компонента.

Вид закона перемещения компонентов [2]:

$$S_2(S_1) = S_1 + \frac{\frac{2(S_1 - z_{p0})}{f_1'^2} \pm \sqrt{\frac{4(z_{p0} - S_1)^2}{f_1'^4} - 4(1 - P) \frac{z_k^2 + (z_{p0} - S_1)^2}{f_1'^4}}}{2 \frac{z_k^2 + (z_{p0} - S_1)^2}{f_1'^4}} - \Delta_0$$

При следующих исходных параметрах:

$z_k := 24.467$	Конфокальный параметр лазера	мм
$f_1 := 198$	Фокусное расстояние первого компонента	мм
$f_2 := 210$	Фокусное расстояние второго компонента	мм
$hp := 0.1$	Радиус пятна исходной перетяжки	мм
$hp' := 0.05$	Радиус пятна выходной перетяжки	мм
$z_{p0} := -112$	Начальное значение z_p	мм
$\Delta_0 := -387.67$	Начальное значение Δ	мм
$\alpha := \left(\frac{hp'}{hp}\right)^2 = 0.25$ Продольное увеличение		
$P := \frac{\left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2}{\alpha} = 4.5$ Уровень функции $P(\Delta, z_p)$		

Получим такой характер поведения функции:

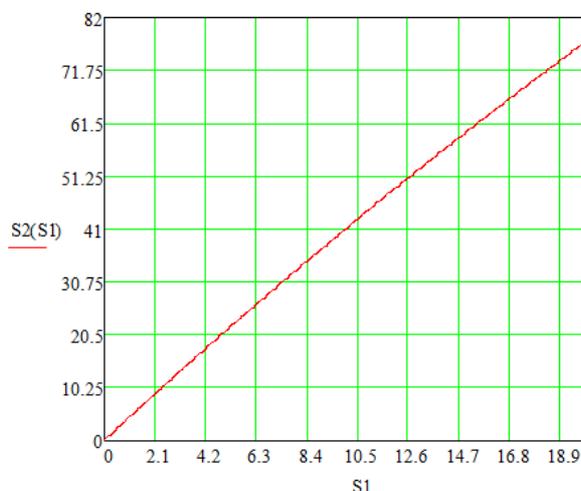


Рис. 7. Пример зависимости $S_2(S_1)$ в мм

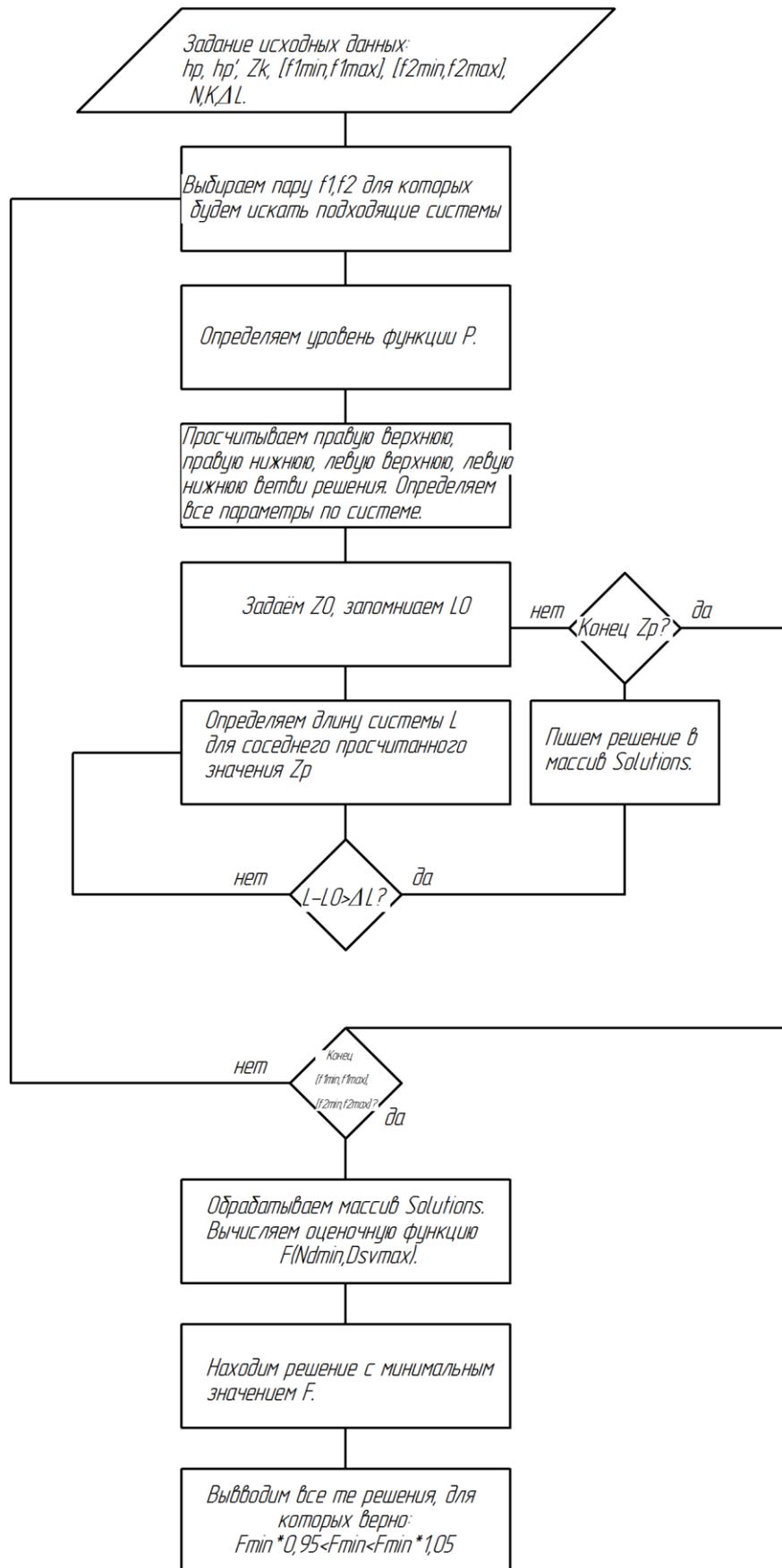


Рис. 8. Схема алгоритма габаритного синтеза

Список литературы

1. Пахомов И.И. Расчет преобразования лазерного пучка в оптических системах. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 53 с.
2. Ширанков А.Ф., Пахомов И.И., Иванов В.А., Аниканов А.Г., Штыков С.А., Носов П.А., Павлов В.Ю. Способ и устройство для перемещения перетяжки лазерного пучка: пат. 2411598 Российская Федерация. 2011. Бюл. № 4. 11с.
3. Носов П.А. Синтез оптических системы для формирования лазерных пучков с требуемыми характеристиками. Режим доступа:
<http://professorjournal.ru/PJGrantsPrograms/GrantMaterialsServlet?grantmId=1317490&grantmType=lecttext> (дата обращения 05.09.2014).