



С. А. Гончуков М. В. Ковшов В. Г. Шевченко

049-88

П  
Г65

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛОСКИХ  
И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЛОМАНЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ (ЛОР)

МОСКВА 1988

Государственный комитет СССР  
по народному образованию

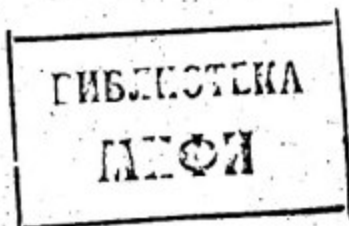
Московский ордена Трудового Красного Знамени  
инженерно-физический институт

С.А.Гончуков М.В.Ковшов В.Г.Шевченко

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПЛОСКИХ И  
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДОМАНИХ ОПТИЧЕСКИХ  
РЕЗОНАТОРОВ (ДОР)

Препринт 049-88

БИБЛИОТЕЧНЫЙ  
ФОНД  
ИИФУ ИИФМ



Утверждено  
редсоветом института

Москва 1988

Гончуков С.А., Ковшов М.В., Шевченко В.Г. Исследование устойчивости плоских и пространственных ломаных оптических резонаторов (ЛОР). - М.: Препринт/МИФИ, 049-88, 1988. - 24 с.

С помощью геометрико-графического представления результатов проведен детальный анализ зависимости устойчивости трехзеркального плоского и многозеркального пространственного ЛОР от конфигурации резонатора. Показано, что области устойчивости сложным образом зависят от параметров ЛОР, а в окрестности границ устойчивости характер изменения потерь существенно различен. Экспериментально подтвержден расчетный характер движения рабочей точки на диаграмме устойчивости ЛОР.

Предложена и реализована методика анализа и синтеза устойчивых пространственных ЛОР произвольной конфигурации.

Приведен пример автоматизированного синтеза оптимального по устойчивости ЛОР с помощью диалоговой системы ПРАГАЛ-ДИСС. Описано разработанное проблемно-ориентированное программное обеспечение.

## ВВЕДЕНИЕ

Наряду с простыми двухзеркальными резонаторами в лазерной технике все шире применяются устройства, имеющие излом оптической оси и единую резонансную полость, состоящую из большого числа зеркал (гироскопы, акселерометры, технологические измерительные и управляющие системы и др.). Принципиально важным уже для простейших 2-зеркальных систем вопрос устойчивости приобретает в случае с ломаными оптическими резонатором (ЛОР) первостепенную значимость.

Первые работы по исследованию устойчивости 2-зеркальных резонаторов принадлежат Фоку и Ли [1], Бойду и Гордону [2], Когельнику [3-5]. Условия устойчивости ломанных плоских резонаторов впервые были сформулированы Коллинзом [6,7].

Результаты работ [1-7] позволили составить теоретическое описание ЛОР и объединить их общей методикой расчета (методы лучевых матриц, Коллинза). Однако до сих пор не были исследованы степень влияния различных параметров ЛОР на устойчивость системы в целом и характер движения изображающей рабочей точки (р.т.) на диаграмме устойчивости в зависимости от их изменения. Предложенный Коллинзом алгоритм расчета плоской системы [7] целесообразно также развить на пространственный случай. Рассмотрение данных вопросов является весьма актуальным для практического использования ЛОР.

В работе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования устойчивости плоских и пространственных ЛОР, методика автоматизированного анализа и синтеза их конфигурации, описание диалогового оптимизационного и проблемно-ориентированного программного обеспечения для решения рассмотренных задач на ЭВМ.

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ ЛОР

Любой реальный резонатор содержит оптические элементы (в их число входит уже сама активная среда). Присутствие оптических элементов приводит к определенной степени изменения характеристик резонатора (устойчивости, спектра частот, распределения

поля и др.). Если искажением пренебречь невозможно и его необходимо учитывать при расчете, резонатор характеризуют как сложный. В случае, когда после отражений в сложном резонаторе пучок лучей не остается гомоцентрическим, т.е. его центр не формирует стигматические изображения в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, резонатор называют астигматическим. Если при этом присутствует изменение направления оси резонатора, то говорят о ломаном резонаторе.

При расчете устойчивости ЛОР будем основываться на подходе, связанном с преобразованием исходной системы к эквивалентной схеме с набором линз вместо преломляющих поверхностей (вида представленной на рис.1), предложенном в работе Коллинза [7].

При построении методики расчета рассматриваются электромагнитные поля в оптическом резонаторе с фокусирующими элементами. Рассмотрение ограничивается случаем, когда поля на краях оптических элементов малы, так что значительное влияние апертуры отсутствует.

Аналитическое решение задачи опирается на принцип Гюйгенса, но обладает общностью в том смысле, что выражения, относящиеся к геометрии определенного оптического резонатора, записываются через константы ("коэффициенты оптического пути"), которые для конкретного резонатора могут быть легко оценены. Поля на двух конечных отражающих поверхностях связаны уравнением, вытекающим из последовательного применения принципа Гюйгенса, а инженерное решение интегрального уравнения в [7] получается с использованием приближения эквивалентного конфокального резонатора (ЭКР).

В результате решения интегрального уравнения общего вида получены условия устойчивости ЛОР. В астигматическом резонаторе для направлений X и Y применяются раздельные условия устойчивости; они получаются при выполнении требования на действительность решения интегрального уравнения (верхняя граница) и имеют вид

$$\frac{4 R_{\text{MIN}} \cdot R_{\text{MIN}}}{R_{\text{MIN}}^2} < 1. \quad (1)$$

Нижняя граница получается из условия малости величины присутствующих потерь:

$$\frac{R_{MNN}}{R_{MIN}} \geq 0 \quad (I-a)$$

где  $\mu = x, y$ ,  $R_{ij}$  - "коэффициенты оптического пути", являющиеся функциями длины, фокусного расстояния и коэффициентов преломления [7],  $i, j = 1, N$ .

Условие (I-a) эквивалентно  $R_{MIN} R_{MNN} \geq 0$  ( $R_{MIN} \neq 0$ ), следовательно, поскольку  $R_{MIN}^2$  в (I) имеет положительное значение, (I) и (I-a) можно совместить:

$$0 \leq \frac{4R_{MIN} \cdot R_{MNN}}{R_{MIN}^2} \leq 1. \quad (2)$$

Для удобства рассмотрения можно ввести диаграмму устойчивости, аналогичную известной для двухзеркального резонатора (в ней  $R_{ij}$  непосредственно связаны с множителями  $g_1$  и  $g_2$  [1]). Тогда  $g_1 = 2R_{MIN}/R_{MIN}$ ;  $g_2 = 2R_{MNN}/R_{MIN}$  (коэффициент 2 в дальнейшем опустим), имеем

$$0 \leq \frac{R_{MIN} \cdot R_{MNN}}{R_{MIN}^2} \leq 1. \quad (3)$$

Порядок вычисления  $R_{ij}$  состоит в следующем [8]. Каждому координатному сечению ЛОР соответствует некоторый характеристический определитель ( $D_x$  и  $D_y$ ), зависящий от расположения и оптической силы элементов в данном сечении. В случае астигматического резонатора эти определители не равны.

Характеристический определитель представляет собой определитель  $(N-1)$ -го порядка; в нем отличны от нуля только диагональные и соседние с ними элементы. Первая и последняя строки содержат по два ненулевых элемента

$$a_{11} = f_2 - l_{12}; \quad a_{12} = -f_2; \quad (4)$$

$$a_{(N-1)(N-2)} = -f(N-1); \quad a_{(N-1)(N-1)} = f(N-1) - l_{(N-1)N}.$$

Остальные элементы определителя имеют вид:

$$a_{i(i-1)} = -f_i; \quad a_{ii} = f_i + f_{(i+1)} - l_{i(i+1)}; \quad (5)$$

$$a_{i(i+1)} = -f_{(i+1)},$$

где  $f_i$  - фокусное расстояние линзы эквивалентной схемы,  $l_{i(i+1)}$  - расстояние между последовательно расположенными линзами. Коэффициенты разложения эйконала Кольдиза выражаются через характеристический определитель и его миноры  $D_{i,k}$  [7]:

$$P_{M11} = -\left(\frac{1}{R_{M1}} + \frac{D_{M11}}{D_M}\right),$$

$$P_{MNN} = -\left(\frac{1}{R_{MN}} + \frac{D_{M(N-1)(N-1)}}{D_M}\right); \quad (6)$$

$$P_{M1N} = (-1)^{N-1} \frac{D_{M1(N-1)}}{D_M},$$

где  $R_{Mi}$  - радиус  $i$ -го зеркала в рассматриваемом сечении ( $\mu=x, y$ ).

Можно убедиться, что при изменении положений концевых сечений коэффициенты разложения эйконала меняются, однако величина

$$G_M = \frac{P_{M11} \cdot P_{MNN}}{P_{M1N}} \quad (7)$$

для данного меридионального сечения  $\mu=x, y$  остается постоянной, что подтверждает (3) и позволяет выполнить его вычисление.

Приведенный подход и послужил основой для построения методики исследования плоского/пространственного ЛОР.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОГО ЛОР

Рассмотрим простейший вариант плоского ЛОР, представляющего собой плоскую трехзеркальную систему. На рис.2 приведены его оптическая и эквивалентная схемы. Пусть одно торцевое и среднее зеркала имеют положительные радиусы кривизны ( $R_{1,2} > 0$ ), а другое торцевое зеркало - плоское ( $R_3 = \infty$ ). Наклонное падение излучения на среднее зеркало под углом  $\varphi$  делит оптиче-

кую ось на два прямых участка  $l_{12}$  и  $l_{23}$ , сумма которых составляет полную длину резонатора  $l_1$ . В эквивалентной схеме резонатора среднее зеркало заменяется фокусирующей эллиптической линзой, а торцевые зеркала сохраняются неизменными. Выражения для фокусов линзы по выделенным направлениям имеют вид

$$f_x = \frac{R_2 \cdot \cos \varphi}{2}; \quad f_y = \frac{R_2}{2 \cdot \cos \varphi}. \quad (8)$$

Результаты проведенного теоретического исследования представим в виде общепринятой диаграммы устойчивости в осях  $\mathcal{G}_1$  и  $\mathcal{G}_2$ . Как было показано выше, эти величины сложным образом зависят от конфигурации ЛОР. Параметр  $G_{11}$ , являющийся их произведением, представляет собой гиперболический параболоид, сечения которого по уровням 0 и I и дают границы областей устойчивости.

На рис.3 каждой точке на диаграмме соответствует конкретная конфигурация резонатора. Если радиус кривизны  $R_1$  задан, то множество рабочих точек располагается на луче, исходящем из определенного места на диаграмме. Например, из т.А при  $R_1 = 0,5$  м или из т.В при  $R_1 = 2$  м. Наклон лучей определяется отношением плеч  $l_{12}/l_{23}$ . Причем для  $l_{12} = l_{23}$  лучи проходят в средней части диаграммы, пересекаясь с нижней ветвью гиперболы в т. D (прямая COD лежит на оси симметрии диаграммы). При  $l_{12} > l_{23}$  они расположены в верхней части диаграммы, при  $l_{12} < l_{23}$  - в правой. Для заданного отношения плеч все лучи пересекаются с гиперболой в одной точке, разворачиваясь вокруг нее при изменении  $R_1$ . При этом начало луча определяется значением  $R_1$ . В пределе  $l_{12} \rightarrow 0$  и  $l_{23} \rightarrow 0$  лучи стремятся принять вертикальное и горизонтальное положения соответственно.

Если заданы радиусы кривизны торцевых зеркал, то ЛОР, отличающийся значениями  $R_2$  и  $\varphi$ , соответствует семейству рабочих точек, составляющему на луче определенный отрезок. При увеличении  $R_2$  границы отрезка перемещаются к началу луча, а длина отрезка уменьшается. На диаграмме, в частности, показано как изменяется одна (верхняя) граница отрезка на луче AA' с увеличением радиуса кривизны среднего зеркала:

т. А (0,5) соответствует  $R_2 = 0,5$  м и  $\varphi = 0$ , а т.А (2) -  $R_2 = 2$  м и  $\varphi = 0$ . При  $R_2 = \infty$  длина отрезка равна нулю, т.к. обе границы стягиваются в начало луча. Например, в т.А при  $R_1 = 0,5$  м или в т.В при  $R_1 = 2$  м. Если все зеркала плоские, то семейство рабочих точек вырождается в т.С.

Обращение длины отрезка в нуль при использовании плоского среднего зеркала имеет очевидное объяснение. Действительно, при заданных зеркалах изменение угла падения  $\varphi$  приводит к смещению р.т. в пределах определенного отрезка, что связано с астигматизмом при наклонном отражении, который тем больше, чем меньше  $R_2$ . Если же  $R_2 = \infty$ , то независимо от  $\varphi$  эквивалентным для ЛОР является обычный двухзеркальный линзовый резонатор с  $L = l_{12} + l_{23}$ , не содержащий внутри своей полости линзы ( $f_x = f_y = \infty$ , см. [8]). Другими словами, угол  $\varphi$  не должен сказываться на устойчивости ЛОР, что и отражается в нулевой длине отрезка.

Более детальное исследование плоского трехзеркального ЛОР объясняется и тем, что лазер с таким резонатором представляет практический интерес в связи с перспективой применения метода внутррезонаторной отражательной лазерной фазометрии в оптических измерениях [9]. Результаты расчетов сравним с экспериментальными данными, полученными с трехзеркальным гелий-неоновым лазером на длине волны 3,39 мкм со следующими параметрами:  $R_1 = 0,5$  м,  $R_3 = \infty$ ,  $l_{12} = 0,06$  м, и  $l_{23} = 0,34$  м. Как следует из вышесказанного, семейство рабочих точек такого ЛОР располагается на луче  $AA'$  (рис.3). В зависимости от значений  $R_2$  и  $\varphi$  он может быть как устойчивым, так и неустойчивым.

На рис.4 приведена зависимость  $\varphi$  от  $R_2$ . Три сплошные линии, полученные расчетным путем, являются границами областей устойчивости (неустойчивые области заштрихованы). Экспериментальные диапазоны углов  $\varphi$ , соответствующие устойчивой работе лазера, даны вертикальными отрезками. В измерениях использовались средние зеркала с различными радиусами кривизны; их можно разделить на две группы: зеркала с коэффициентами отражения около 10% (обозначены кружками) и с коэффициентами отражения не менее 95% (обозначены квад-

ратами). Как видно, независимо от коэффициентов отражения зеркал хорошо описывается верхняя граница устойчивости. Средняя граница согласуется с экспериментальными данными только при использовании прозрачных зеркал. При применении же высокоотражающих зеркал лазер генерирует при всех значениях угла  $\varphi$  ниже верхней границы. Полученный результат позволяет предположить, что характер изменения потерь в окрестности границ устойчивости существенно различный. Определить этот характер при плоскостной графической интерпретации (в том числе с помощью традиционной диаграммы устойчивости) не представляется возможным.

В рамках теории Коллинза [7] прямых данных о величине потерь получить нельзя. Однако в окрестности границ устойчивости можно утверждать, что отклонение параметра  $G_x$  от 1 в сторону увеличения и от 0 в сторону уменьшения качественно соответствует увеличению потерь.

В связи с этим был выполнен расчет изменения параметра  $G_x$  в зависимости от  $R_2$  и  $\varphi$ . Результаты расчета приведены на рис.5 в виде трехмерной картинки, полученной в результате моделирования на ЭВМ. Видно, что изменение  $G_x$  от указанных величин соответствует поверхности сложной формы. Сечения этой поверхности на уровнях 0 и 1 показано сплошными линиями, которые в проекции на плоскость  $R_2-\varphi$  дают границы устойчивости на рис.4. Как следует из рис.5, выход из области устойчивости, связанный с пересечением верхней границы ( $G_x = 1$ ), сопровождается резким увеличением  $G_x$ , а значит, и существенным ростом потерь. В области границ, соответствующих  $G_x = 0$ , ситуация противоположная - потери изменяются медленно. Поэтому, как и ожидалось, в отличие от верхней нижние границы выражены слабо и при достаточно высоком относительном возбуждении в лазере могут не оказывать существенного влияния на его работу.

Приведенные на рис.3-5 результаты расчетов соответствуют исследованию условия  $0 < G_x < 1$ . При выяснении устойчивости ЛОР необходимо также учитывать условие  $0 < G_y < 1$ . Нарушение любого из них означает, что ЛОР становится неустойчивым. Однако в нашем случае в соответствии с конфигурацией

( ось  $OX$  лежит в плоскости ломаного резонатора ) раньше всегда нарушается первое условие. Поэтому можно ограничиться исследованием поведения только параметра  $G_{\Sigma}$ .

Проведенное исследование было выполнено для трехзеркального ЛОР с некоторыми фиксированными параметрами. Однако его можно легко распространить на ЛОР любой конфигурации. При этом развитая методика расчета и анализа является общей для любых ЛОР.

### 3. УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЛОР

#### 3.1. Методика расчета

В работе [7] указывается на возможность развития предложенного подхода к исследованию устойчивости ЛОР на третье измерение, т.е. для пространственных ЛОР. Такие ЛОР находят применение на практике. Однако соответствующей методике расчета в [7] не приводится. В этой связи было предложено дополнить модель подвижным пространственным треугольником  $OXYZ$  с правосторонней системой координат (рис.6а).

Орт  $Z$  пространственного треугольника определяется осью ЛОР и выбранным направлением обхода резонатора. Орты  $X$  и  $Y$  до первого наклонного отражения не определены, далее их положение необходимо уточнить: считаем, что при первом соприкосновении с зеркалом орт  $Y$  совпадает с направлением, вокруг которого осуществляется поворот оптической оси. Орт  $X$  при этом дополняет треугольник до правого. Определение таким образом после первого наклонного отражения (излома оси), все три орта  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  при дальнейших соприкосновениях с зеркалами поворачиваются в пространстве вокруг осей  $OX$  или  $OY$  в соответствии с конкретной схемой ЛОР.

Как уже указывалось, каждое наклонное отражение в эквивалентной схеме представляется эллиптической линзой, помещенной между опорными плоскостями прямого резонатора. При этом большому фокусу ( $f_{max} = \frac{R}{2 \cos \varphi}$ ) будет приписан индекс той оси, вокруг которой осуществляется разворот.

В рассматриваемом ЛОР стоячей волны число разворотов вокруг каждой из осей  $OX$  и  $OY$  при полном обходе резона-

тора с возвращением в исходную точку должно быть четным. При этом сумма углов разворота вокруг соответствующей оси равна нулю, что может служить проверкой правильности записи выражений для  $f_{i\mu}$  ( $\mu = x, y$ ) эквивалентной схемы.

В общем случае выражения для  $f_{i\mu}$  ЛОР могут иметь как положительный, так и отрицательный знаки в зависимости от того, какой отражатель (собирающий или рассеивающий) исходной системы они заменили.

В случае системы, представленной на рис. 6а, таким образом, для промежуточных зеркал имеем:

$$\begin{aligned} 3.2 : \sphericalangle OY, f_{2x} &= R_2 \cdot \cos \varphi_2 / 2 ; f_{2y} = R_2 \cdot \sec \varphi_2 / 2 ; \\ 3.3 : \sphericalangle OX, f_{3x} &= R_3 \cdot \sec \varphi_3 / 2 ; f_{3y} = R_3 \cdot \cos \varphi_3 / 2 ; \\ 3.4 : \sphericalangle OY, f_{4x} &= R_4 \cdot \cos \varphi_4 / 2 ; f_{4y} = R_4 \cdot \sec \varphi_4 / 2 ; \\ 3.5 : \sphericalangle OX, f_{5x} &= R_5 \cdot \sec \varphi_5 / 2 ; f_{5y} = R_5 \cdot \cos \varphi_5 / 2 . \end{aligned}$$

Поскольку общее число поворотов вокруг осей  $OX$ ,  $OY$  четное, а алгебраическая сумма углов при полном обходе резонатора (с возвращением к 3.1) равна нулю (зеркала находятся в вершинах параллелепипеда), то выражения для  $f_{i\mu}$  составлены правильно.

На построенной для пространственного случая диаграмме устойчивости (рис. 6б) общие свойства местоположений рабочих точек (найденные в случае трехзеркального плоского резонатора) сохраняются. Так, например, при 6 зеркалах ( $N = 6$ ,  $R_6 = \infty$ ), постоянных  $\varphi = 45^\circ$  (см. рис. 6а) плем семейства лучей  $A'$ ,  $A''$ ,  $A'''$ , определяемые наборами плеч  $\ell_{12} - \ell_{56}$  (длина в метрах):  $A'$  - (0,01 0,01 0,01 0,01 0,01);  $A''$  - (0,01 0,01 0,04 0,01 0,01);  $A'''$  - (0,04 0,01 0,01 0,01 0,01), что соответствует зависимости местоположения направлений лучей от смещения пропорций в длинах плеч к 3.1 или 3.6. В то же время, при наибольшем среднем звене (случай  $A''$ ) семейство проходит через центр диаграммы устойчивости. Развертку в семействе по лучам дают различные значения  $R_{2, \dots, 5} = R$ . Отмеченные уровни  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  характеризуются равными  $R_1$  (0,5 м), сами лучи сформированы изменением  $R_1$ , а изолинии равных уровней по  $R_1$  определены дли-

ной резонатора.

Заполнение направления лучами (например,  $OB$ ) происходит неравномерно с увеличением плотности лучей при удалении от центра.

Таким образом, знание траектории движения р.т. на диаграмме устойчивости позволит делать быструю качественную и с достаточно хорошей точностью количественную оценку устойчивости ЛОР. Нахождение диапазонов устойчивости при решении задачи анализа с любой требуемой точностью возможно с применением моделирования на ЭВМ в (квази)реальном масштабе времени как в режиме *off-line*, так и *on-line*.

### 3.2. Решение оптимизационной задачи синтеза

Для решения задачи синтеза устойчивого линейного (стоячей волны) пространственного ЛОР по условиям методики п.3.1 воспользуемся методом штрафных функций. В качестве критерия устойчивости примем условие близости  $G_M$  к 0,5:

$$\min G(\vec{f}) = (G_x - 0.5)^2 + (G_y - 0.5)^2 \quad (9)$$

при  $\vec{f} = \{f_1, \dots, f_i, \dots, f_m\}; a_j \leq q_j(\vec{f}) \leq b_j; i=1, N; j=1, m. (10)$

В качестве переменных  $f_i$  могут выступать любые варьируемые параметры ЛОР.

Преобразуем задачу нелинейного программирования (9) с ограничениями (10) в эквивалентную исходную задачу без ограничений:

$$\min G(\vec{f}, z) = G(\vec{f}) + \sum_{j=1}^m \hat{\varphi}(q_j(\vec{f}, z)), \quad (11)$$

где  $G(\vec{f}, z)$  - штрафная функция;  $\hat{\varphi}$  - нагрузочная функция;  $z$  - коэффициент штрафа.

Нагрузочная функция должна удовлетворять условию

$$\lim (\hat{\varphi}(\psi, z)) = \begin{cases} 0, & \psi > 0 \\ \infty, & \psi < 0 \end{cases} \quad (12)$$

и может быть выбрана в виде

$$\hat{\varphi}(\psi, z) = \frac{1}{z} \exp(-z\psi). \quad (13)$$

Тогда, соответственно, задачу минимизации

$$\min G(\vec{\xi}, z) = G(\vec{\xi}) + \frac{1}{z} \sum_{j=1}^m \exp(-z q_j(\vec{\xi})) \quad (14)$$

можно уже решать методом сопряженных градиентов [10].

Пример. Проведем численный расчет в задаче синтеза устойчивого пространственного ЛОР рис.6а (размерность в метрах):

$$\min G(\vec{\xi}, z) = (G_x - 0.5)^2 + (G_y - 0.5)^2 \quad (15)$$

при  $0.01 \leq \xi_{1-5} \leq 0.03$

$$0.5 \leq \xi_6 \leq 1$$

и начальных условиях  $\xi_{1-5}^{(0)} = 0.01$ ;  $\xi_6^{(0)} = 0.5$ .

В качестве переменных  $\xi_1 - \xi_5$  взяты соответственно плечи  $l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{45}, l_{56}$ , а  $\xi_6$  - одновременно изменяющийся радиус всех промежуточных зеркал  $R$ .  $R_1$  использовался в качестве параметра.

После решения на ЭВМ с перебором значений точностей одномерного поиска и вычисления градиента, величины коэффициента штрафа и критериев останова наилучшее достигнутое решение составило:  $G(\vec{\xi}, z) = 0,805 \cdot 10^{-6}$ , при этом  $l_{12} = 0,0146$ ;  $l_{23} = 0,0145$ ;  $l_{34} = 0,0144$ ;  $l_{45} = 0,0144$ ;  $l_{56} = 0,0145$ ;  $R = 1,0$ .

Степень влияния в заданных интервалах на устойчивость пространственного ЛОР оказалась наибольшей со стороны плеч, затем радиусов промежуточных зеркал и радиуса первого зеркала. В процессе расчета угол падения/отражения был постоянным и равным  $45^\circ$ .

#### 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ ЛОР

Разработанное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированного анализа и синтеза ЛОР стоячей волны входит составной частью в интегрированную

систему (ИС) ПРАГАЛ-ДИОС [10,11]. ИС состоит из диалогового интерфейса физика-исследователя, ППП ПРАГАЛ и диалоговой оптимизационной системы ДИОС. Реализованы процедурный входной язык ИС и язык-интерпретатор ПРАГАЛ.

Интеграция ПРАГАЛ и ДИОС осуществляется через блок управления (БУ) интегрированной системы. Функции БУ заключаются в следующем:

- 1) вход-выход из ИС;
- 2) ознакомление пользователя со структурой ИС и программными средствами управления БУ;
- 3) обеспечение смены режимов работы, т.е. перехода ПРАГАЛ-ДИОС/ДИОС-ПРАГАЛ с сохранением промежуточных данных.

ППП ПРАГАЛ представляет собой библиотеку программы моделирования, методов расчета и идентификации газовых лазеров. ДИОС позволяет решать оптимизационные задачи пользователю, не обладающему знаниями по работе с вычислительной машиной, программами оптимизации и операционной системой. Это определяется формой и структурой взаимодействия пользователя с системой, которые основаны на пассивном диалоге.

В диалоговом режиме происходит идентификация пользователя, выбор типа решаемой задачи, уточняется формулировка и вводятся данные, необходимые для ее решения.

В ходе диалога ведется простейший контроль вводимых данных на тип и диапазон изменения параметров. В каждом вопросе система предусматривает ответ по умолчанию (значение в скобках). Перед ответом на вопрос путем ввода знака "?" возможно получение справочной информации. После однократного решения пользователь может изменить параметры решения задачи, метод или параметры метода решения.

ИС ПРАГАЛ-ДИОС работает под управлением операционной системы RT-II (РАФОС). Все модули диалогового интерфейса реализованы на макроязыке ПАГЕН, который должен присутствовать в операционной среде.

Просчет приведенного в п.3.2 примера на комплексе АРМ-М занимает 3,5 минут (с отображением результатов на графическом дисплее), при условии протоколирования на АЦПУ и графо-

построителе - 5-7 минут. Объем минимально используемой оперативной памяти составляет 28 Кслов, внешней памяти - 210 блоков; для получения твердой копии (например, рис.5) используется система машинной геометрии и графики САГРАФ [12].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим основные результаты проделанной работы:

1. Проведено детальное теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости трехзеркального ЛОР. Показано, что области устойчивости сложным образом зависят от конфигурации резонатора. В окрестности границ устойчивости характер изменения потерь в зависимости от параметров резонатора существенно различен, что по-разному сказывается на работе лазера.
2. Предложена и реализована методика анализа и синтеза устойчивых пространственных ЛОР произвольной конфигурации. Исследованы траектории движения изображающей рабочей точки на диаграмме устойчивости ЛОР.
3. С применением методов оптимизации и геометрико-графического исследования создано прикладное программное обеспечение автоматизированного анализа и синтеза ЛОР на ЭВМ. В рамках интегрированной системы ПРАГАЛ-ДНОС реализован диалоговый интерфейс, ориентированный на пользователя-непрограммиста.

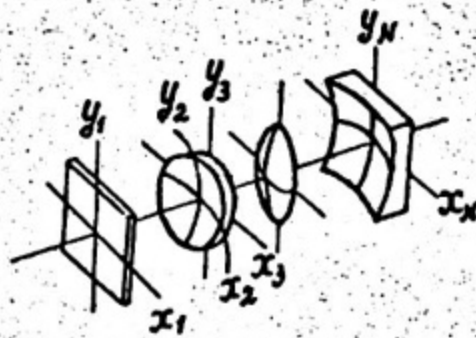


Рис.1. Эквивалентная схема астигматического резонатора

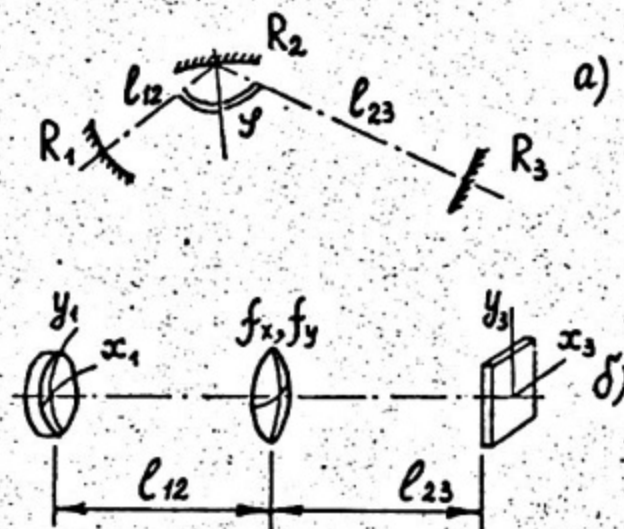


Рис.2. Оптическая (а) и эквивалентная (б) схемы плоского трехзеркального резонатора

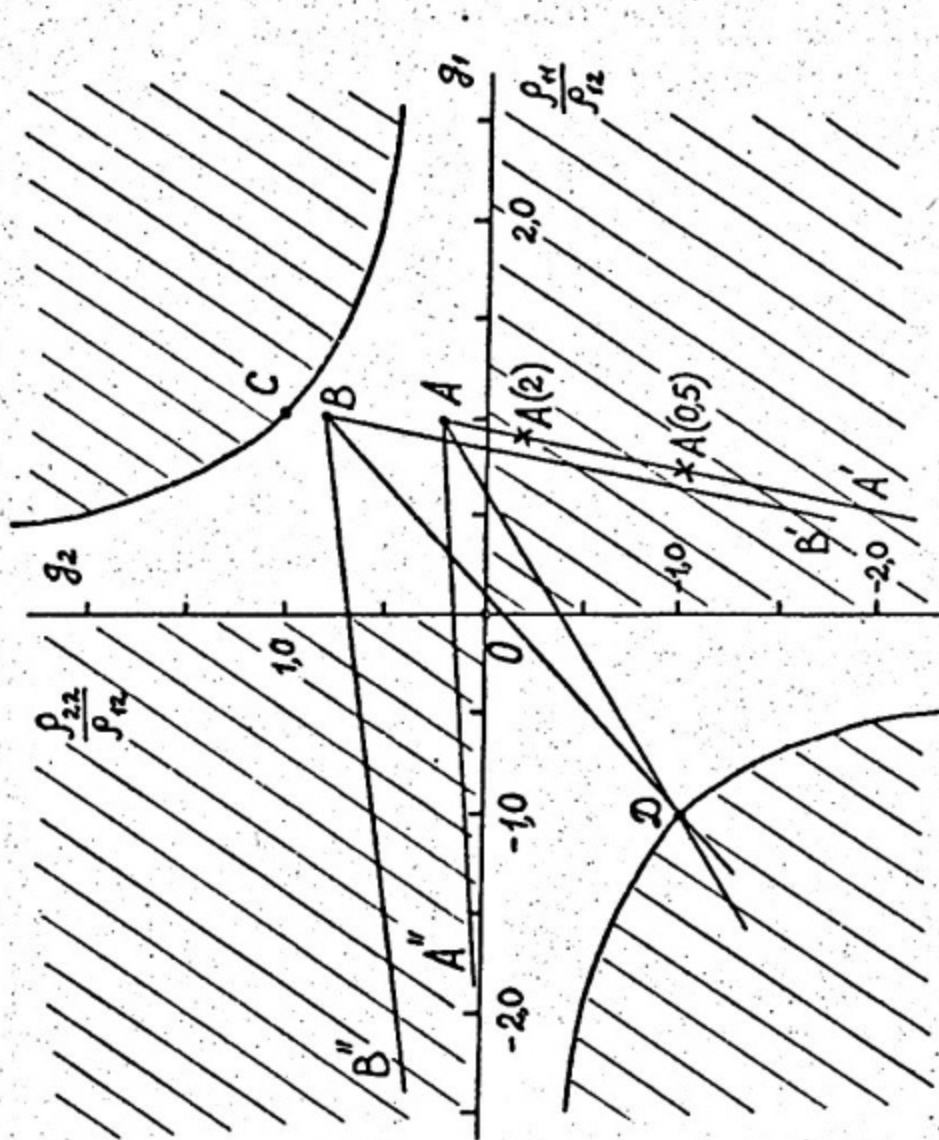


Рис.3. Диаграмма устойчивости трехзеркального ЛОР

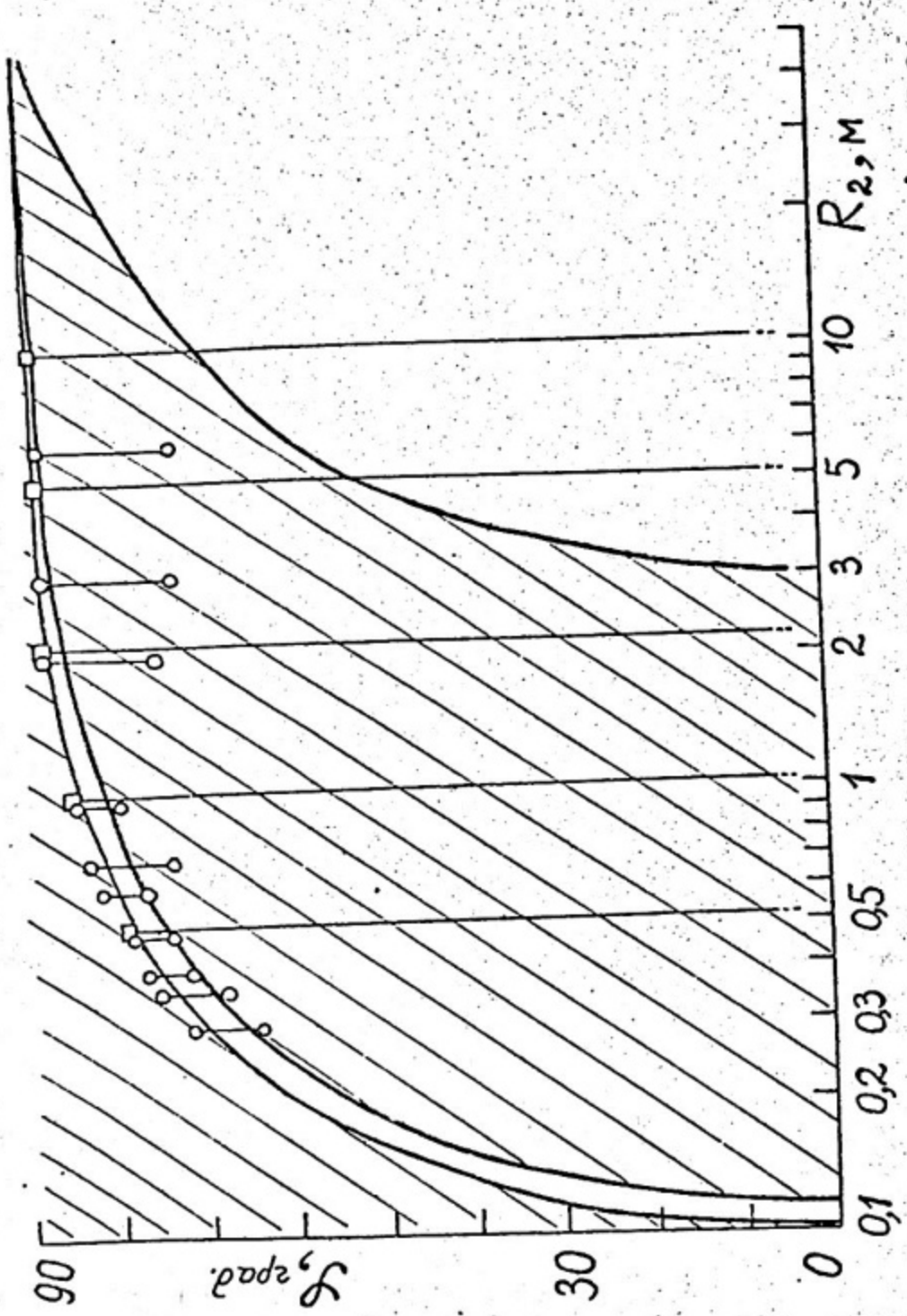


Рис. 4. Зависимость  $\psi$  от  $R_2$  для  $R_1 = 0,5\text{м}$ ,  $R_3 = \infty$ ,  $\rho_{12} = 0,06\text{м}$  и  $\rho_{23} = 0,34\text{м}$   
 (области неустойчивости заштрихованы)

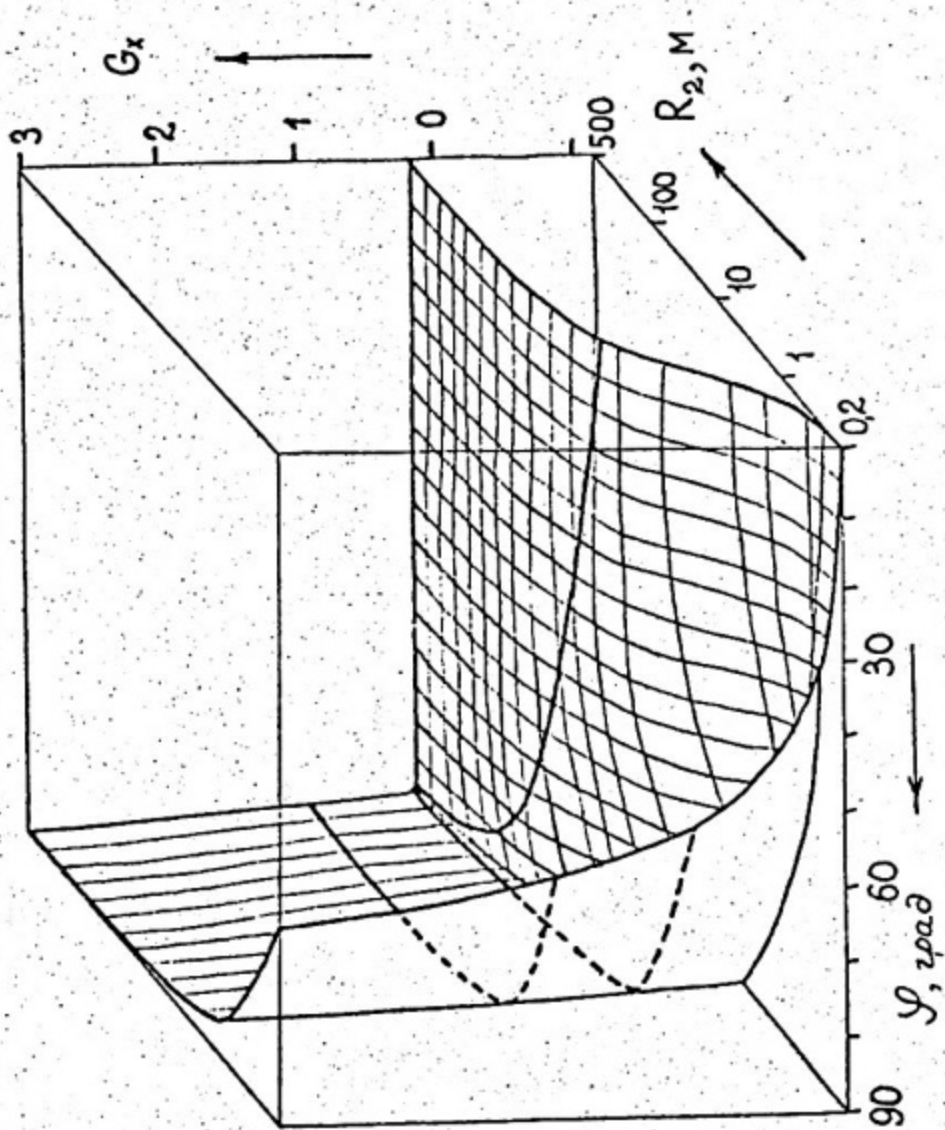


Рис.5. Поведение  $G_x$  в зависимости от  $\varphi$  и  $R_2$  для  $R_1 = 0,5 \text{ м}$ ,  
 $R_3 = \infty$ ,  $l_{1/2} = 0,06 \text{ м}$ ,  $l_{23} = 0,3 \text{ м}$ .

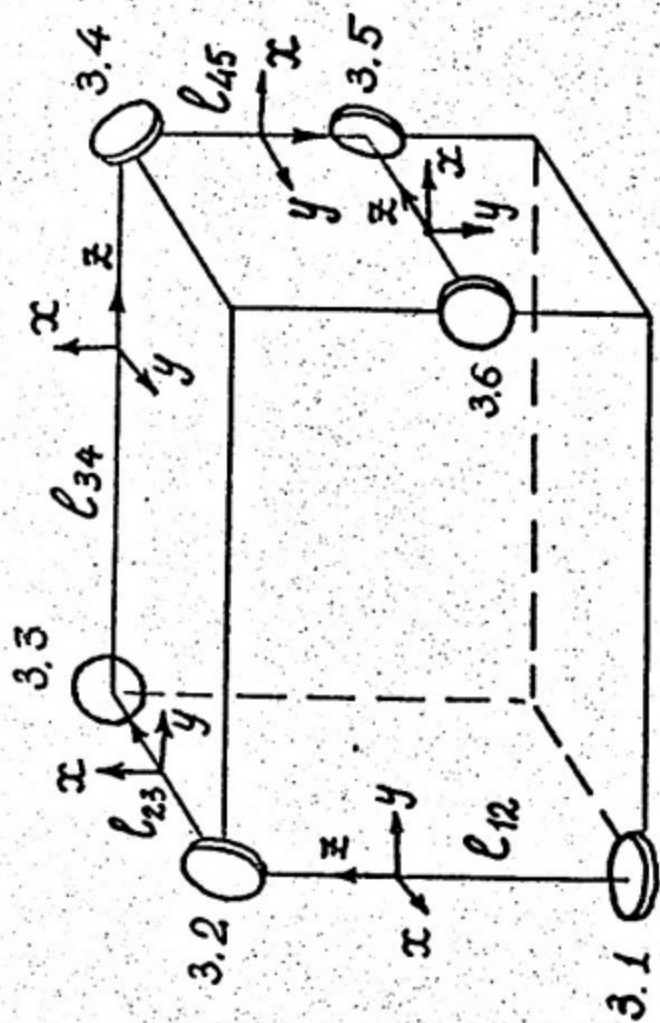


Рис. 6а. Оптическая схема пространственного шестизеркального ЛОР

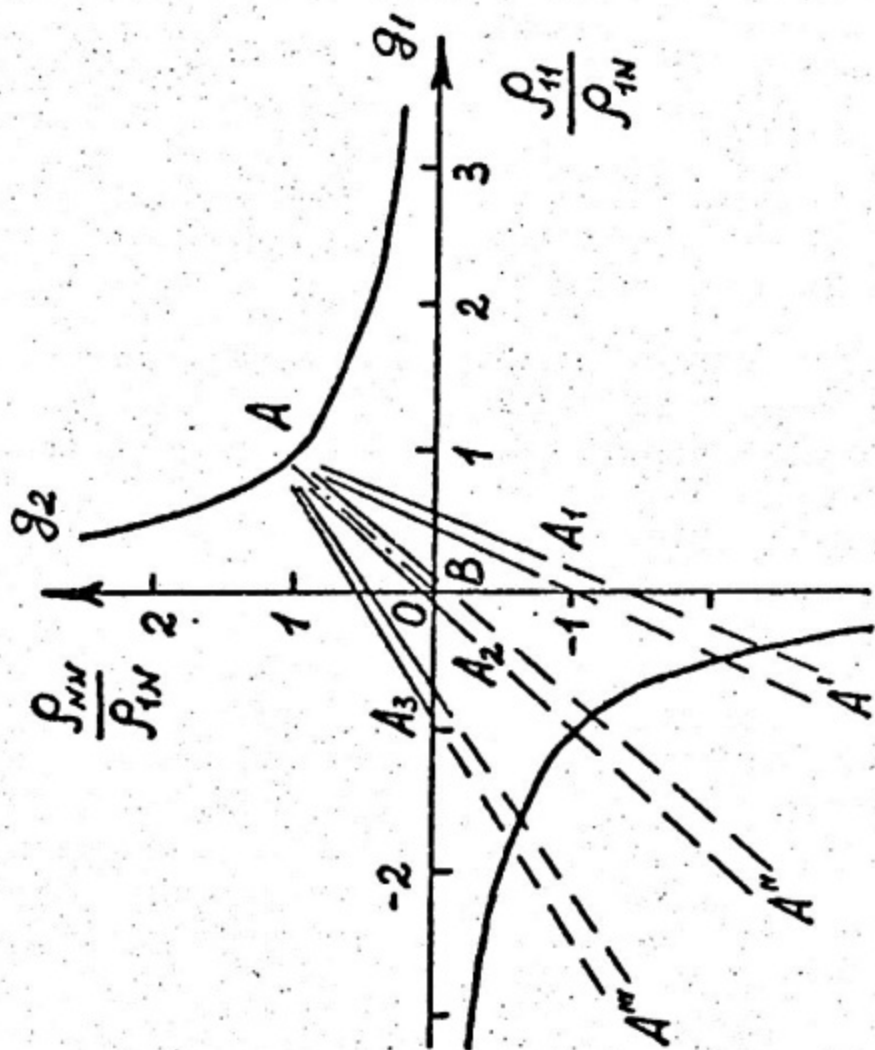


Рис. 66. Диаграмма устойчивости пространственного ЛОР

## ЛІТЕРАТУРА

1. A. G. Fox, T. Li, *Bell System Techn. J.*, N40, p. 453, 1961.
2. G. D. Boyd, J. P. Gordon, *Bell System Techn. J.*, N40, p. 489, 1961.
3. G. D. Boyd, H. Kogelnik, *Bell System Techn. J.*, N41, p. 1347, 1961.
4. Kogelnik H. *Imaging of Optical modes resonators with internal lenses.* - *Bell System Techn. J.*, v. 44, N3, p. 455-493, 1965.
5. Kogelnik H., Li T. *Laser beams and resonators.* - *Appl. Opt.*, v. 5, N10, p. 1550-1567, 1966.
6. Collins S. A., Davis D. T. M. *Modes in a triangular optical resonator.* - *Appl. Opt.*, v. 3, N11, p. 1314-1315, 1964.
7. Collins S. A. *Analysis of optical resonators involving focusing elements.* - *Appl. Optics*, v. 3, N11, p. 1263-1275, 1964.
8. Пшонко Е. Ф. *Открытие оптически резонаторы: Некоторые вопросы теории и расчета.* - М.: Сов. радио, 1980.
9. Баранков В. В., Гольяев О. М., Гончуков С. А. *Внутрирезонаторная отражательная лазерная фазометрия.* - М.: Препринт МИИИ, 048-87, 1987.
10. Александров В. М., Вязьмин С. А., Шевченко В. Г. *Алгоритмы решения оптимизационных задач.* - М.: ЦЕЛСИА, 1987.
11. Шевченко В. Г. *Математические модели и методы в автоматизированном исследовании и проектировании газовых лазеров.* - В кн.: Тезисы докладов Всесоюзного семинара "Информатика и вычислительная техника". - М.: Наука, 1986, с. 79.
12. Пиллягин В. В., Сумароков Л. Н. *Языковые средства пользователя автоматизированных систем обработки геометрической и графической информации.* - В кн.: *Машинная графика баз данных.* - М.: ИЦЭТИ, 1984, с. 5-51.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	3
1. Теоретическое описание свойств ЛОР .....	3
2. Теоретическое и экспериментальное исследование плоского ЛОР .....	6
3. Устойчивость пространственного ЛОР .....	10
3.1. Методика расчета .....	10
3.2. Решение оптимизационной задачи синтеза ...	12
4. Программное обеспечение расчетов ЛОР .....	13
Заключение .....	15
Литература .....	22

Сергей Александрович Гончуков  
Максим Викторович Ковшов  
Василий Геннадьевич Шевченко

Исследование устойчивости плоских и пространственных  
ломаных оптических резонаторов (ЛОР)

Рукопись поступила в издательский отдел 30.06.88

Редактор Е.Г.Станкевич

Ответственный за выпуск В.Г.Шевченко

---

Л. - 50344	Подписано в печать 16/07-88г.	Формат 60x84 1/16
П.л. I,5	Уч.-изд. л. I,5	Тираж 120 экз.
Изд. № 049-88	Заказ 2069	Цена 10 коп.

---

Типография МИИМ, Каширское шоссе, д.31