

# ЛЕКЦИЯ № 1

## 1. Общие понятия о геометрических аберрациях и их классификация

Аберрации (от лат. *aberratio*) – это погрешности в изображении предметов, образуемых оптическими системами. Проявляются они в том, что оптические изображения в ряде случаев не вполне отчетливы, не точно соответствуют по форме предмету или оказываются окрашенными.

Реальные оптические системы, представляющие практический интерес, имеют входные и выходные зрачки конечных, а иногда и весьма больших размеров и обладают большими полями. Углы между лучами и оптической осью, углы падения и преломления лучей на оптических поверхностях и высоты лучей на этих поверхностях в реальных системах также оказываются весьма большими. Такие системы лишь в очень малой (параксиальной) области около оптической оси, где изображения предметов строятся лучами с малой апертурой и в пределах очень малого поля, дают так называемые безаберрационные изображения, т. е. такие изображения, когда точка изображается в виде точки, линия – в виде линии, а плоскость – в виде плоскости. В этой области свойства реальной системы аналогичны свойствам идеальной системы. Вне этой области все присущие идеальной системе свойства нарушаются. Направление прошедшего через реальную оптическую систему вне параксиальной области луча не совпадает с направлением луча, рассчитанного по формулам идеальной оптической системы. Пучок лучей, вышедший из какой-либо точки плоскости предмета, после прохождения системы не собирается в одной точке плоскости изображения, т. е. пучок теряет гомоцентричность. Изображение плоскости предмета, являющееся совокупностью изображений его точек, оказывается в общем не отчетливым, не вполне соответствует изображаемому предмету и даже может оказаться окрашенным (если изображение создается лучами света в видимой части спектра). В этом и проявляется наличие погрешностей изображения, называемых аберрациями.

Все аберрации, как показано на рисунке 1, можно разбить на две группы: монохроматические и хроматические. К монохроматическим аберрациям относятся пять аберраций, а к хроматическим – четыре аберрации. Группу монохроматических аберраций разбивают на две подгруппы: аберрации широкого пучка и полевые аберрации.

К aberrациям широкого пучка относятся сферическая aberrация и кома. К полевым aberrациям относятся астигматизм, кривизна изображения и дисторсия. Хроматические aberrации также делятся на две подгруппы: первичные и вторичные. К первичным aberrациям относятся хроматизм положения и хроматизм увеличения, а к вторичным – вторичный спектр и сферохроматизм.



Рис. 1. Классификация aberrаций

Монохроматические aberrации вычисляются для лучей одной длины волны, а хроматические – для лучей двух и более длин волн.

## 2. Понятие, точное вычисление и график сферической aberrации

Сферическая aberrация относится к aberrациям широкого пучка лучей и состоит в том, что лучи одной длины волны, исходящие из осевой точки предмета, в пространстве изображений в одну точку не собираются.

Если показанная на рисунке 2 некоторая оптическая система из  $p$  оптических поверхностей дает параксиальное изображение осевой точки  $A$  плоскости предмета в точке  $A'_0$  на расстоянии  $s'_0$  от вершины  $O_p$

последней поверхности системы, то идущий под углом  $\sigma$  к оптической оси луч на высоте  $m$  в плоскости входного зрачка выходит из системы под некоторым углом  $\sigma'$  к оси на высоте  $m'$  в плоскости выходного зрачка и дает действительное изображение  $A'$  той же точки  $A$  на расстоянии  $s'$ . Каждому лучу, идущему под определенным конечным углом  $\sigma$ , соответствует своя точка  $A'$ . Вместо одного изображения осевой точки предмета получается бесконечное множество изображений.

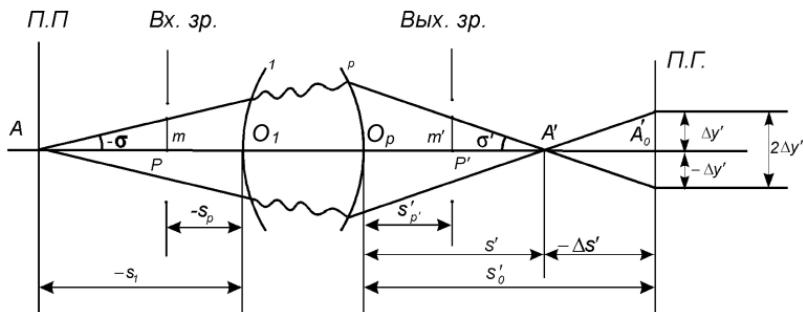


Рис. 2. Сферическая aberrация

Пучок лучей в пространстве предметов в виде конуса с углом  $2\sigma$  с вершиной в точке  $A$  после прохождения системы сохраняет симметрию относительно оптической оси и образует в плоскости Гаусса кружок рассеяния диаметром  $2\Delta y'$ , принимаемый за изображение точки  $A$  в этой плоскости.

Разность

$$\Delta s' = s' - s'_0 \quad (1)$$

называют продольной сферической aberrацией оптической системы для выбранного луча. Это точное значение продольной сферической aberrации, для вычисления которого необходимо рассчитать два луча: первый параксимальный луч и действительный луч, идущий под выбранным углом  $\sigma$ .

Если точка  $A'$  расположена слева от плоскости Гаусса, то  $\Delta s' < 0$ . Если же точка  $A'$  лежит справа от этой плоскости, то  $\Delta s' > 0$ .

Из рисунка 2 следует, что

$$\Delta y' = \Delta s' \cdot \operatorname{tg} \sigma'. \quad (2)$$

Величина  $\Delta y'$  есть точное значение поперечной сферической aberrации оптической системы для выбранного луча. Очевидно,

видно, при изменении знака угла  $\sigma$  знак продольной сферической аберрации не меняется, а поперечной меняется на противоположный.

Сферическую аберрацию принято представлять в виде графиков ее зависимости от  $m$ ,  $m'$ ,  $\operatorname{tg}\sigma$  или  $\operatorname{tg}\sigma'$ , чаще используют зависимость от  $\operatorname{tg}\sigma'$ . Для построения таких графиков рассчитывают несколько действительных лучей (от 2 до 4 и более – в зависимости от сложности системы), пересекающих входной зрачок на разных высотах. Пример таких графиков приведен на рисунке 3. Обычно численные значения этих высот выбирают так, чтобы их квадраты составляли арифметическую прогрессию. Например, если радиус входного зрачка равен  $m_{kp}$  (высота крайнего луча), то берут  $m_1 = m_{kp}$  и  $m_1 = \sqrt{\frac{1}{2}}m_{kp}$  или  $m_1 = m_{kp}$ ,  $m_1 = \sqrt{\frac{3}{4}}m_{kp}$ ,  $m_1 = \sqrt{\frac{2}{4}}m_{kp}$  и  $m_1 = \sqrt{\frac{1}{4}}m_{kp}$ .

Если смещать плоскость установки (плоскость, в которой вычисляется поперечная сферическая аберрация) влево относительно плоскости Гаусса, то величина кружка рассеяния  $2\Delta y'$  будет уменьшаться. Можно найти такое положение плоскости установки, когда этот кружок окажется наименьшим. Для наглядности оценки величины кружка рассеяния лучей в такой плоскости на графике поперечной сферической аберрации проводят некоторую вспомогательную прямую  $aa'$  (рис. 3), наклон которой относительно ординаты будет тем больше, чем больше смещение плоскости установки относительно плоскости Гаусса.

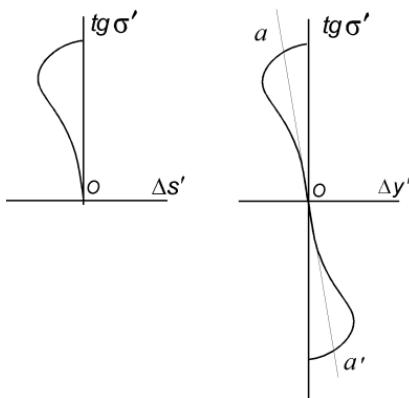


Рис. 3. Графики продольной и поперечной сферической аберрации

Поперечная сферическая аберрация в смещенной плоскости будет теперь отсчитываться на графике не от оси ординат, а от наклонной прямой  $aa'$ . Наклон прямой  $aa'$ , проходящей через начало координат, связан с величиной  $\Delta$  смещения плоскости установки относительно плоскости Гаусса приближенной зависимостью

$$\Delta = \frac{\Delta y'}{\operatorname{tg} \sigma'},$$

в которой  $\Delta y'$  и  $\operatorname{tg} \sigma'$  – координаты любой точки, принадлежащей прямой  $aa'$ .

Сферическая аберрация присуща и лучам, исходящим из внеосевых точек предмета. В этом случае ее называют *половой сферической аберрацией*. При этом роль линии, относительно которой определяется сферическая аберрация, выполняет главный луч. Пучок лучей, обладающий симметрией относительно главного луча в пространстве предметов, эту симметрию в пространстве изображений не теряет. На практике чаще сферическую аберрацию относят к осевой точке предмета.

### 3. Понятие, точное вычисление и график комы

Кома (от *греч. комё* – волосы) относится к аберрациям широких пучков лучей, исходящих из внеосевой точки плоскости предмета. Сущность ее можно понять из следующих рассуждений.

Пучок лучей, исходящих из внеосевой точки плоскости предмета и заполняющих весь входной зрачок, можно представить в виде совокупности бесконечного числа пучков, встречающих плоскость входного зрачка по окружностям, центры которых совпадают с центром зрачка, а радиусы изменяются от 0 до половины диаметра зрачка. Очевидно, такие пучки будут проходить через различные области оптической системы.

Кома заключается в том, что каждый из названных пучков дает изображение внеосевой точки предмета в виде окружности, радиус которой будет тем больше, чем больше радиус пучка в плоскости зрачка. Центры этих окружностей не находятся в одной точке плоскости изображения, а удаляются от оптической оси по мере роста радиуса пучка в плоскости зрачка. В результате наложения таких окружностей друг на друга изображение внеосевой точки, даваемое оптической системой в целом, принимает вид несимметричной фигуры рассеяния лучей, похожей по форме на комету с ярко выраженной головой и широким хвостом, плотность энергии в котором быстро

убывает к периферии (изложенное будет наглядно показано ниже при рассмотрении комы третьего порядка).

Наличие комы приводит к тому, что монохроматический пучок лучей, исходящих из внеосевой точки плоскости предмета симметрично относительно главного луча, в пространстве изображений эту симметричность утрачивает. Степенью нарушения указанной симметричности внеосевого пучка лучей оценивают величину комы численно.

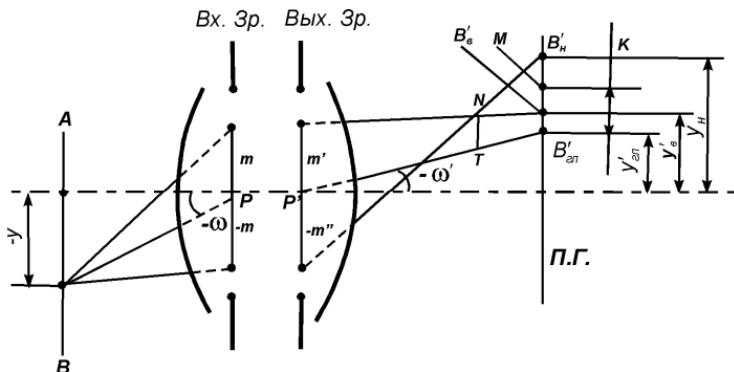


Рис. 4. Меридиональная кома широкого пучка лучей

На рисунке 4 показан ход широкого плоского меридионального пучка лучей, исходящего из внеосевой точки  $B$  плоскости предмета, расположенной на расстоянии  $y$  от оптической оси. Верхний луч пучка пересекает входной зрачок на высоте  $m$ , нижний – на высоте  $-m$ , а главный проходит через центр зрачка; пучок лучей в пространстве предметов симметричен относительно главного луча. По закону теории Гаусса (при отсутствии аберраций), все лучи этого пучка в пространстве изображений должны были бы встретиться в одной точке, принадлежащей плоскости Гаусса. Но из-за наличия аберраций верхний луч встретит эту плоскость в точке  $B'_s$  на расстоянии  $y'_s$ , нижний – в точке  $B'_n$  на расстоянии  $y'_n$ , а главный – в точке  $B'_{el}$  на расстоянии  $y'_{el}$  от оптической оси соответственно.

Верхний и нижний лучи пересекаются в точке  $N$ , не принадлежащей ни главному лучу, ни плоскости Гаусса и находящейся на расстоянии  $NT$  в перпендикулярном к оптической оси направлении от главного луча. Пучок лучей утратил симметрию относительно главного луча.

Из рисунка следует, что величина возникшей фигуры рассеяния лучей в меридиональной плоскости равна отрезку  $B'_{\text{гл}}B'_h$ , а точка  $M$ , делящая пополам отрезок  $B'_eB'_h$ , находится на расстоянии

$$\frac{y'_e + y'_h}{2}$$

от оптической оси. Отрезок  $B'_{\text{гл}}M$ , равный отступлению точки встречи главного луча с плоскостью Гаусса от середины между точками встречи с этой плоскостью верхнего и нижнего лучей пучка, численно характеризует величину меридиональной комы, вычисляемой по формуле

$$K = \frac{y'_e + y'_h}{2} - y'_{\text{гл}}. \quad (3)$$

Степень нарушения симметричности пучка лучей в пространстве изображений относительно главного луча наглядно характеризует отрезок  $NT$ . Если бы этого нарушения не было, то точка  $N$  оказалась бы на главном луче, точка  $M$  совпала бы с точкой  $B'_{\text{гл}}$ , кома в соответствии с (3) оказалась бы равной нулю, а фигура рассеяния лучей приобрела бы форму круга. Рассеяние пучка лучей в этом случае возникло бы из-за полевой сферической aberrации.

Величина комы, определяемая формулой (3), характеризует только меридиональную кому. Для определения сагиттальной комы необходимо рассчитывать ход внemerидиональных (косых) лучей.

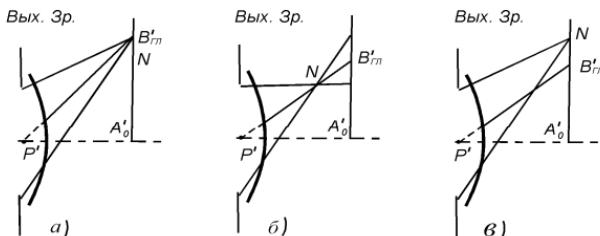


Рис. 5. Различные случаи меридиональной комы

Совместное действие комы и полевой сферической aberrации приводит к различным видам нарушений симметрии пучка лучей в пространстве изображений, некоторые из которых приведены на рисунке 5.

1. Кома и полевая сферическая aberrация исправлены. Верхний и нижний лучи встречаются в точке  $B'_{\text{гл}}$  в плоскости Гаусса (рис. 5а).

2. Кома исправлена, но имеет место полевая сферическая aberrация. Верхний и нижний лучи симметричны относительно главного луча и пересекаются на главном луче вне плоскости Гаусса (рис. 5б).

3. Полевая сферическая aberrация исправлена, но имеет место кома в чистом виде (рис. 5в).

Выражение (3) можно преобразовать следующим образом. Введем обозначения:

$$\begin{aligned}\Delta y'_s &= y'_s - y'_{el}, \\ \Delta y'_h &= y'_h - y'_{el}.\end{aligned}$$

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned}y'_s &= y'_{el} + \Delta y'_s, \\ y'_h &= y'_{el} + \Delta y'_h.\end{aligned}$$

Подставляя эти значения  $y'_s$  и  $y'_h$  в (3), получим

$$k = \frac{\Delta y'_s + \Delta y'_h}{2}. \quad (4)$$

Для оценки величины комы с помощью графика обычно рассчитывают главный луч и ряд меридиональных лучей, исходящих из внеосевой точки плоскости предмета и пересекающих плоскость входного зрачка по всему его диаметру. Для каждого такого луча, пересекающего плоскость Гаусса на расстоянии  $y'$  от оптической оси и образующего в пространстве изображений с оптической осью угол  $\sigma'$ , вычисляют разность  $\Delta y' = y' - y'_{el}$  и строят график, характеризующий зависимости  $\Delta y'$  от  $\Delta \operatorname{tg} \sigma' = \operatorname{tg} \sigma - \operatorname{tg} \sigma'_{el}$ , где  $y'_{el}$  и  $\sigma'_{el}$  относятся к главному лучу. График такой зависимости для примера показан на рисунке 6. Из рисунка следует, что при  $\Delta \operatorname{tg} \sigma' = \pm a$  имеем соответственно  $\Delta y' = -0,3$  и  $\Delta y' = 0,2$ . В соответствии с (4)  $k = \frac{-0,3 + 0,2}{2} = -0,05$ . При этом удвоенная величина комы  $2k = -0,1$  наглядно видна из графика.

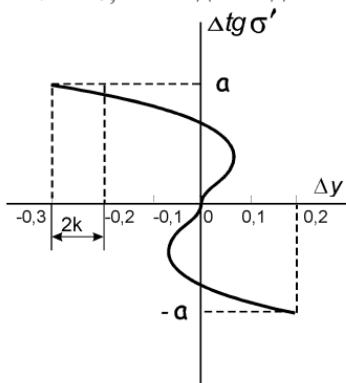


Рис. 6. График зависимости  $\Delta y'$  от  $\Delta \operatorname{tg} \sigma'$

## ЛЕКЦИЯ № 2

### 4. Понятие, точное вычисление и график астигматизма и кривизны изображения

*Астигматизм* (от греч. *a* – отрицательная частица, *stigme* – точка) – монохроматическая аберрация, относящаяся к числу полевых aberrаций элементарных астигматических пучков лучей, возникающих из-за неодинаковой кривизны поверхностей центрированной оптической системы в разных плоскостях сечений по линиям встречи этих пучков с оптическими поверхностями.

Элементарный пучок лучей, исходящий из внеосевой точки плоскости предмета, в пространстве изображений собирается не в одну точку, а в двух расположенных на некотором расстоянии друг от друга взаимно перпендикулярных элементарных отрезках. Оба этих отрезка перпендикулярны главному лучу; один из них расположен в меридиональной плоскости, а другой – в сагиттальной плоскости.

На рисунке 7 такой пучок лучей, исходящий из внеосевой точки  $B$  в плоскости предмета, пронизывает элементарную площадку входного зрачка, ограниченную контуром  $M_1N_1M_2N_2$ . Главный луч  $BP$  пучка в пространстве изображений идет по направлению  $P'B'$ , встречающая плоскость Гаусса в точке  $B'$ . Плоский элементарный меридиональный пучок лучей  $M_1BM_2$  в пространстве изображений собирается в точке  $B'_m$  на главном луче, отстоящей от плоскости Гаусса на расстояние  $z'_m$ . Плоский элементарный сагиттальный пучок лучей  $N_1BN_2$  в пространстве изображений собирается не в точке  $B'_m$ , а в некоторой другой точке  $B'_s$  главного луча на расстоянии  $z'_s$  от плоскости Гаусса. Точки  $B'_m$  и  $B'_s$  называют фокусами меридионального и сагиттального пучков соответственно.

Лучи плоских элементарных меридиональных пучков с вершиной в точке  $B$ , пересекающих площадку  $M_1N_1M_2N_2$  по линиям, параллельным отрезку  $M_1M_2$ , в пространстве изображений пронизывают некоторый элементарный отрезок  $B_1B_2$ , которому принадлежит точка  $B'_m$  главного луча. Отрезок  $B_1B_2$  перпендикулярен главному лучу и расположен в сагиттальной плоскости.

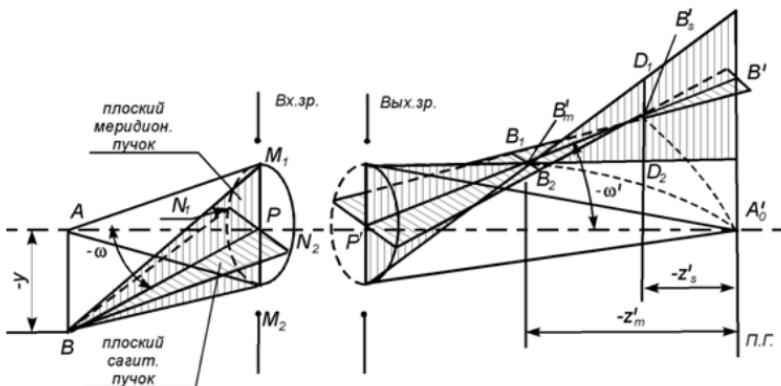


Рис. 7. Астигматизм и кривизна изображения

Аналогично лучи плоских элементарных сагиттальных пучков с вершиной в точке  $B$  и пересекающих площадку  $M_1N_1M_2N_2$  по линиям, параллельным отрезку  $N_1N_2$ , в пространстве изображений пронизывают некоторый другой элементарный отрезок  $D_1D_2$ , которому принадлежит точка  $B'_s$  главного луча. Отрезок  $D_1D_2$  также перпендикулярен главному лучу, но расположен в меридиональной плоскости.

Таким образом, элементарный астигматический пучок лучей, исходящих из внеосевой точки  $B$ , в пространстве изображений нигде в одну точку не собирается. После выхода из оптической системы сначала он проходит через отрезок  $B_1B_2$ , а затем через отрезок  $D_1D_2$ . Следовательно, отрезки  $B_1B_2$  и  $D_1D_2$  являются изображением одной и той же точки  $B$  плоскости предмета с помощью меридиональных и сагиттальных плоских элементарных пучков лучей соответственно.

По ходу главного луча от точки  $B'_m$  до точки  $B'_s$  фигура рассеяния пучка лучей в сечениях, перпендикулярных главному лучу, изменяет форму, проходя стадии в виде отрезков  $B_1B_2$ , в виде вытянутого в сагиттальном направлении эллипса, в виде круга, в виде вытянутого в меридиональном направлении эллипса, в виде отрезка  $D_1D_2$ .

Разность

$$\Delta_{acm} = z'_s - z'_m \quad (5)$$

численно определяет астигматизм оптической системы для взятой величины углового поля  $\omega$ .

При изменении положения точки  $B$  на отрезке  $AB = y$  геометрическим местом точек  $B'_m$  и  $B'_s$  оказываются некоторые кривые линии  $B'_m A'_0$  и  $B'_s A'_0$  соответственно. Следовательно, отрезок  $AB$  плоскости предмета изобразится в виде двух указанных кривых линий.

Если отрезок  $AB$  повернуть вокруг оптической оси на  $360^\circ$ , то в плоскости предмета он создаст некоторый плоский предмет. При этом ввиду круговой симметрии кривая линия  $B'_m A'_0$  опишет некоторую криволинейную поверхность, которая принимается за меридиональное изображение плоского предмета. Аналогично кривая  $B'_s A'_0$  опишет некоторую другую криволинейную поверхность, которая принимается за сагиттальное изображение того же плоского предмета. В этом случае отрезок  $z'_m$  будет характеризовать кривизну меридиональной поверхности изображения, а отрезок  $z'_s$  – кривизну сагиттальной поверхности изображения для взятого углового поля. Следовательно, из-за астигматизма плоский предмет изображается в виде двух чашеобразных поверхностей вращения. Однако ни в одной из этих поверхностей не получается резкое (точечное) изображение всего предмета, так как каждая его точка изображается в виде элементарных отрезков, один из которых расположен на меридиональной поверхности изображения в сагиттальной плоскости, а другой – на сагиттальной поверхности изображения в меридиональной плоскости.

На меридиональной поверхности изображения резко изобразятся горизонтальные линии плоского предмета, а на сагиттальной поверхности изображения резкое изображение будут иметь вертикальные линии предмета.

Геометрическим местом точек, которые являются серединами отрезков  $B'_m B'_s$ , образованных элементарными астигматическими пучками, вышедшими из всех точек отрезка  $AB$  плоского предмета, является некоторая кривая, занимающая среднее положение между кривыми  $B'_m A'_0$  и  $B'_s A'_0$ . Вращение этой кривой вокруг оптической оси создает некоторую чашеобразную поверхность, занимающую среднее положение между меридиональной и сагиттальной поверхностями изображения. На этой поверхности астигматические пучки лучей образуют круглые фигуры рассеяния, а изображения точек плоского предмета имеют одинаковую нерезкость.

Кривизна описанной поверхности численно может быть оценена величиной

$$(z'_s + z'_m)/2, \quad (6)$$

называемой средней кривизной поверхности изображения.

Тот факт, что изображение плоского предмета оказывается расположенным не на плоскости, а на криволинейной поверхности, рассматривается как наличие отличной от астигматизма самостоятельной aberrации, численно характеризуемой определенной кривизной поверхности изображения.

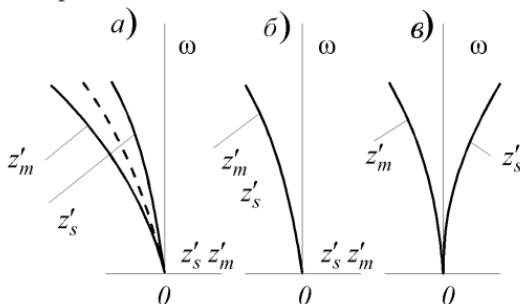


Рис. 8. Графики астигматизма и кривизны изображения

Хотя астигматизм и кривизна поверхности изображения имеют общую физическую причину возникновения, они являются независимыми друг от друга aberrациями. Можно, например, устранить астигматизм, но изображение при этом может располагаться на сильно искривленной неплоской поверхности. При этом оптическая система будет давать одинаково резкое изображение и вертикальных, и горизонтальных штрихов предмета, например на краю поля, но не даст одновременно резкости такого изображения в других областях поля изображения. Если же одновременно с астигматизмом устранена и кривизна изображения, то достигается резкость изображения по всему полю.

На рисунке 8 приведены примеры графиков астигматизма и кривизны изображения элементарных пучков лучей в зависимости от углового поля в пространстве предметов.

1. Астигматизм и кривизна поля имеют место; штриховой кривой показан график средней кривизны поверхности изображения (рис. 8a).

2. Астигматизм исправлен, но имеет место кривизна изображения (рис. 8b).

3. Исправлена средняя кривизна изображения, но астигматизм имеет место (рис. 8б).

Оптические системы с исправленным астигматизмом называются астигматическими или астигматами.

## 5. Понятие, точное вычисление и график дисторсии

Дисторсия (от лат. *distorsio* – искривление) относится к полевой монохроматической аберрации, при которой нарушается геометрическое подобие между предметом и изображением. Причиной возникновения этой аберрации является зависимость линейного увеличения системы от величины предмета (углового поля).

На рисунке 9 главный луч  $BF$ , исходящий из внеосевой точки  $B$  предмета  $AB = y$  под углом  $\omega$  к оптической оси, в пространстве изображений идет по направлению  $P'B'$  под углом  $\omega'$  к оси и образует в плоскости Гаусса изображение  $A'B' = y'$ . Расстояния от входного и выходного зрачков до плоскости предмета и плоскости Гаусса обозначим через  $p$  и  $p'$  соответственно.

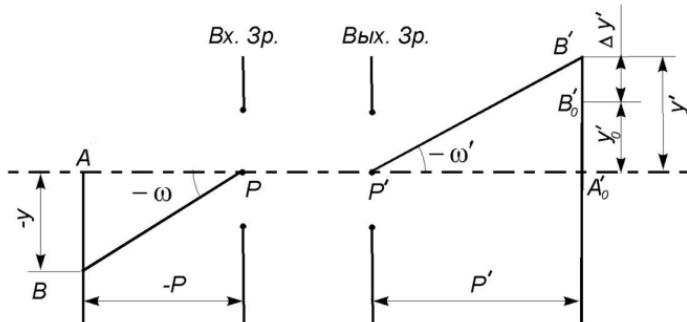


Рис. 9. Дисторсия

Так как  $y = -p \operatorname{tg} \omega$ ,  $y' = -p' \operatorname{tg} \omega'$ , то линейное увеличение оптической системы можно написать в виде

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{p'}{p} \cdot \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega} = \frac{p'}{p} \gamma_p, \quad (7)$$

где  $\gamma_p$  – угловое увеличение в зрачках.

Если углы  $\omega$  и  $\omega'$  бесконечно малы, то главные лучи будут принадлежать параксиальной плоскости, а центр  $P'$  выходного зрачка

будет являться параксиальным изображением центра  $P$  входного зрачка. При возрастании угла  $\omega$  положение точки  $P'$  на оптической оси будет изменяться из-за возникающей продольной сферической аберрации в зрачках, что повлечет за собой изменение расстояния  $r'$ . При этом одновременно будет изменяться и угловое увеличение  $\gamma_p$ . Следовательно, как видно из (7), изменение углового поля в пространстве предметов приводит к изменению линейного увеличения оптической системы, т. е. нарушается геометрическое подобие между предметом и его изображением.

Если бы отношение  $r'/r$  и угловое увеличение  $\gamma_p$  в зрачках в формуле (7) были бы постоянны для различных значений угла  $\omega$ , то линейное увеличение для всех отрезков плоскости предмета было бы одинаково, а изображения фигур плоскости предмета были бы геометрически подобны этим фигурам. Такие виды изображений и соответствующие им оптические системы называют ортоскопическими. Искажение изображений вследствие нарушения ортоскопии и называют дисторсией.

Численно дисторсию можно охарактеризовать разностью  $\beta - \beta_0$ , где  $\beta$  – линейное увеличение оптической системы для взятой величины углового поля  $\omega$ ,  $\beta_0$  – линейное увеличение в параксиальной области (увеличение идеальной оптической системы).

Умножив эту разность на  $y$ , получим разность

$$\Delta y' = y\beta - y\beta_0 = y' - y'_0, \quad (8)$$

характеризующую дисторсию в линейной мере.

В этом выражении  $y'$  определяется ходом действительного луча,  $y'_0$  – ходом главного луча, если бы оптическая система не имела аберраций (идеальная система).

Величину дисторсии оценивают также в относительной мере (в процентах), т. е. величиной

$$\Delta y' = \frac{y' - y'_0}{y'_0} 100\%. \quad (9)$$

При бесконечно удаленном предмете  $y'_0 = f' \operatorname{tg} \omega$ , где  $f'$  – фокусное расстояние оптической системы.

При бесконечно удаленном изображении (например, в телескопической системе) дисторсию количественно оценивают как разность

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)