

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ МОТОРИЗОВАННЫХ ЗЕРКАЛ СО СМЕЩЕННОЙ ОСЬЮ ПОВОРОТА ПРИ ЮСТИРОВКЕ МОЩНОЙ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ

RESEARCH ON KINEMATICS OF MOTORIZED MIRRORS WITH SHIFTED ROTATION AXIS IN ADJUSTMENT OF HIGH-POWER LASER FACILITY

*А. В. Андраманов¹, В. Е. Гаганов¹, И. И. Соломатин¹, А. В. Виноградов¹, А. В. Чарухчев²,
В. А. Малинов², В. С. Попиков²*

*A. V. Andramanov¹, V. E. Gaganov¹, I. I. Solomatina¹, A. V. Vinogradov¹, A. V. Charukhchev²,
V. A. Malinov², V. S. Popikov²*

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

²Акционерное общество «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (НИИОЭП), г. Сосновый Бор

¹Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

²Joint-Stock Company «Research Institute of Optoelectronic Instrument Engineering»

Создана математическая модель управления зеркалом, закрепленным в поворотной оправе со смещенной осью поворота. Обнаружено, что, в общем случае, при воздействии только на вертикальный или только на горизонтальный толкатели поворотной оправы с закрепленным на ней зеркалом происходит смещение отраженного пятна лазерного луча по обеим координатам экрана. Получены зависимости смещения пятна лазерного луча по экрану при отражении от поворотного зеркала при воздействии на толкатели оправы. Решена обратная задача – расчет величины сдвига толкателей поворотной оправы для смещения отраженного луча из точки с координатами (X, Y) в точку с требуемыми координатами $(X + \Delta X, Y + \Delta Y)$. Экспериментальная проверка на стенде автоматической юстировки показала хорошее соответствие расчетных предсказаний и соответствующих им экспериментальных данных. Результаты данных исследований уже используются в ходе разработки последовательности автоматизированной настройки оптического тракта мощной лазерной установки.

A mathematical model to control the mirror fixed in the rotary frame with shifted rotation axis has been developed. It has been found that, in general, when only the vertical or only the horizontal pusher of the rotary frame with the mirror fixed in it are actuated, the reflected spot of the laser beam is displaced along both screen coordinates. The dependences of displacement of the laser beam' spot along the screen at reflection from the rotary mirror at the action on the frame pushers have been gained. The inverse problem, i.e. the calculation of the amount of shift of the rotary frame' pushers for the case of the reflected beam displacement from the point with coordinates (X, Y) to the point with required coordinates $(X + \Delta X, Y + \Delta Y)$, has been solved. The experimental verification on the test bench for automatic adjustment of the laser channel showed a good agreement between the calculated predictions and the corresponding experimental data. The results of these studies are already used in the elaboration of a sequence of automated tuning of an optical path of the high-power laser facility.

Введение

Необходимость разработки системы автоматической юстировки для лазерной установки нового поколения определяется как сокращением количества настройщиков, так и значительным сокращением времени настройки перед проведением

опытов, а также улучшением точности позиционирования пучков на оптических элементах.

Для дистанционного автоматического управления направлением распространения лазерного луча поворотные зеркала закрепляются в моторизованные оправы. Точка вращения этих оправ конструктивно находится в углу оправы и не совпадает

ет с рабочей поверхностью плоскости зеркала. Особенности управления данными оправами вызваны тем, что в общем случае, сдвиг любого из толкателей приводит к смещению отраженного лазерного луча в двух плоскостях.

Разработан алгоритм управления данными моторизованными оправами и проведена его экспериментальная проверка.

Кинематическая схема поворотной оправы

На рис. 1 представлена схематическая конструкция поворотной оправы.

Основные геометрические параметры:

- расстояние от поворотного шарика до толкателя $h_{\text{толкателя}} = 79$ мм;
- расстояние от плоскости, на которую опирается поворотный шарик до плоскости зеркала $H = 20$ мм;
- шаг моторизованного толкателя = 1,25 мкм;
- диаметр зеркала = 100 мм.

Толкатели оправы могут быть или микрометрическими винтами, или моторизованными приводами. Полный ход моторизованного толкателя составляет ± 5 мм от среднего положения.

Математическая модель отражения луча от зеркала

На рис. 2 представлена схема для расчета координат отраженного лазерного луча при заклоне поворотного зеркала. Первоначально зеркало установлено под углом 45° к падающему лучу.

Падающий на зеркало лазерный луч не меняет своей ориентации, и уравнение прямой падающего луча не изменяется во время расчетов. Точка $L(X, Y, Z)$ произвольно выбранная точка на падающем лазерном луче. Точки $M_{\text{лев}}(X, Y, Z)$, $M_{\text{прав}}(X, Y, Z)$, $M_{\text{верх}}(X, Y, Z)$ произвольно выбранные точки в плоскости поверхности зеркала (точка $M_{\text{верх}}$ не показана на рисунке). Координаты этих точек меняются при заклонах зеркала. Вычисление координат точек [1] $M_{\text{лев}}(X, Y, Z)$, $M_{\text{прав}}(X, Y, Z)$, $M_{\text{верх}}(X, Y, Z)$ наиболее просто проводить в системе координат X', Y', Z' с началом в центре поворотов оправы и связанной с неподвижным корпусом оправы рис. 1, 2. Система координат со штрихованными осями ориентирована как показано на рис. 2, причем направление оси OY' совпадает с направлением оси OY экрана. Для вычисления положения отраженного луча из точки L опускаем перпендикуляр на плоскость задаваемую точками $M_{\text{лев}}$, $M_{\text{прав}}$, $M_{\text{верх}}$. Данный перпендикуляр пересекает плоскость зеркала в точке $P(X, Y, Z)$. Вычисляем расстояние между точками L и P . На прямой LP откладываем точку W на расстоянии LP от точки P (рис. 2).

Вычисляем координаты пересечения падающего на зеркало луча с плоскостью зеркала (плоскостью $M_{\text{лев}}$, $M_{\text{прав}}$, $M_{\text{верх}}$) – это точка M . Через точки M и W проводим прямую, по которой будет идти отраженный луч. Пересечение прямой MW с плоскостью XOY будет точкой попадания отраженного луча на экран (цифровой камеры).

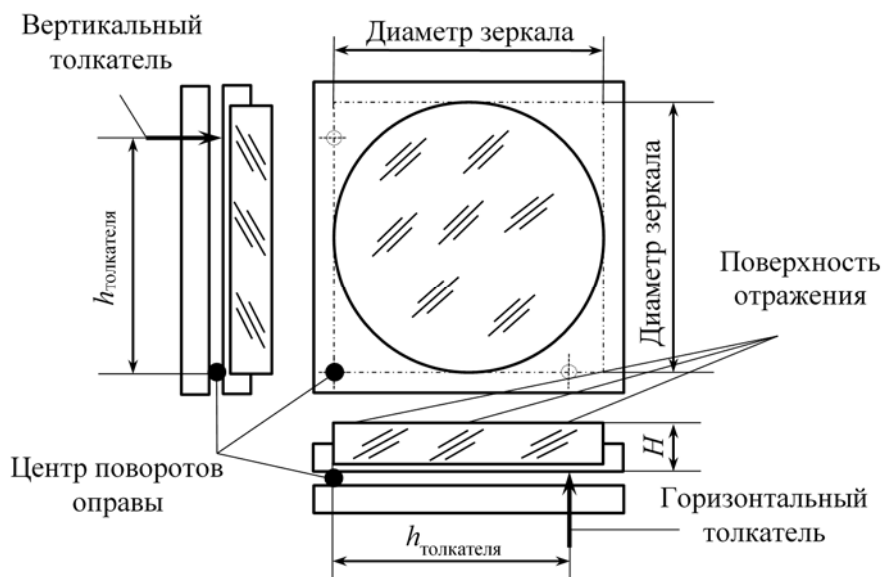


Рис. 1. Эскиз принципиальной кинематической схемы поворотной оправы

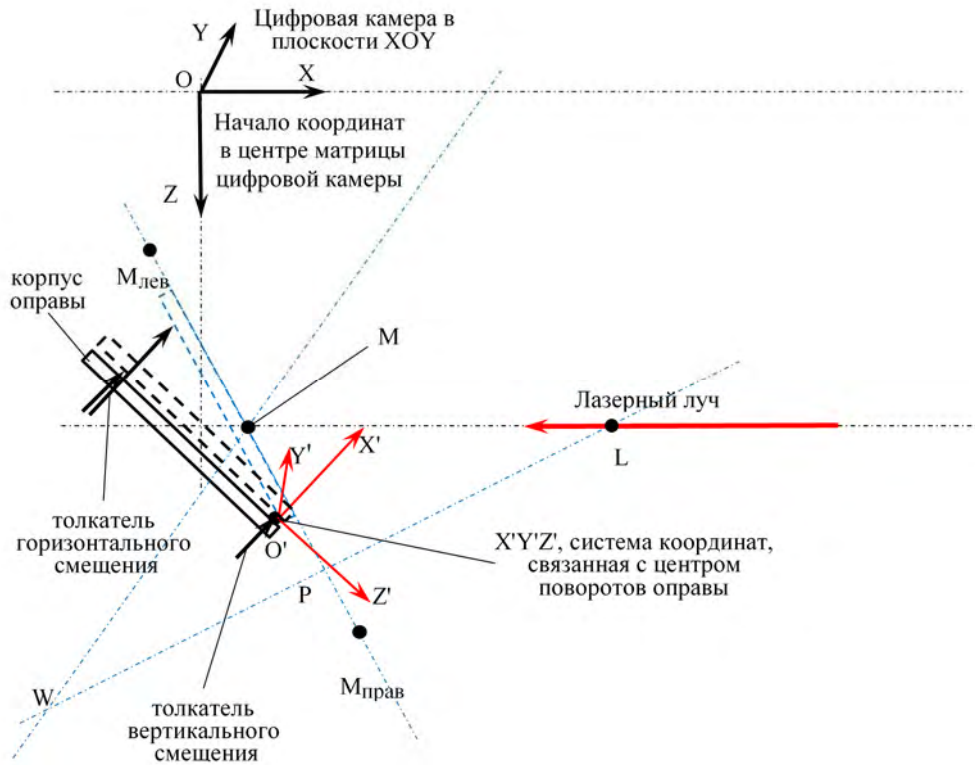


Рис. 2. Принципиальная схема для расчета отраженного луча

Координаты лазерного пятна на экране рис. 2 X и Y – зависят от количества шагов вертикального N_{vert} и горизонтального N_{gor} толкателей оправы. Поэтому заголовки функций координат записываются в виде $X(N_{vert}, N_{gor})$ и $Y(N_{vert}, N_{gor})$.

Значения $X(N_{vert}, N_{gor})$ и $Y(N_{vert}, N_{gor})$ вычисляются как

$$X(N_{vert}, N_{gor}) = XM + \frac{ZM*(XW - XM)}{(ZM - ZW)}, \quad (1)$$

$$Y(N_{vert}, N_{gor}) = YM + \frac{ZM*(YW - YM)}{(ZM - ZW)}, \quad (2)$$

где по рис. 2:

XM, YM, ZM координаты точки падения лазерного луча на зеркало,

XW, YW, ZW координаты точки W .

Вычисления значений координат проведены в программе «Mathcad». Результат расчета координаты X лазерного пятна на матрице цифровой камеры в пикселях, в зависимости от числа шагов приводов толкателей оправы, представляет собой поверхность, представленную на рис. 3.

По рис. 3 видим, что в координатах X $0 N_{vert}$ при фиксированном значении N_{gor} зависимость $X(N_{vert})$ не линейная (параболическая), при изменении значений N_{gor} характер зависимости $X(N_{vert})$ не изменяется; в координатах X $0 N_{gor}$ при фиксированном значении N_{vert} наблюдается линейная зависимость $X(N_{gor})$.

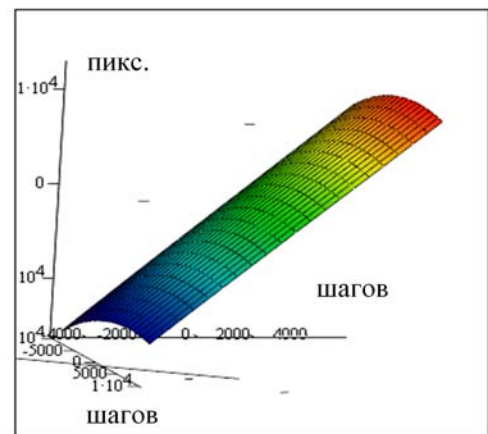


Рис. 3. Зависимость координаты лазерного пятна $X(N_{vert}, N_{gor})$ на матрице цифровой камеры при смещении вертикального и горизонтального толкателей

На рис. 4 представлены зависимости X координаты лазерного пятна на матрице цифровой камеры при воздействии только на вертикальный толкатель оправы, то есть $X(N_{vert}, N_{gor} = const)$.

Ход моторизованного толкателя применяемой нами модели составляет ± 5 мм от среднего положения, что в значениях числа шагов составляет $\frac{\pm 5 \text{ мм}}{1,25 \text{ мкм/шаг}} = \pm 4000$ шагов. Белым цветом выделен диапазон перемещения вертикального толкателя оправы. Синий и зеленый графики соответ-

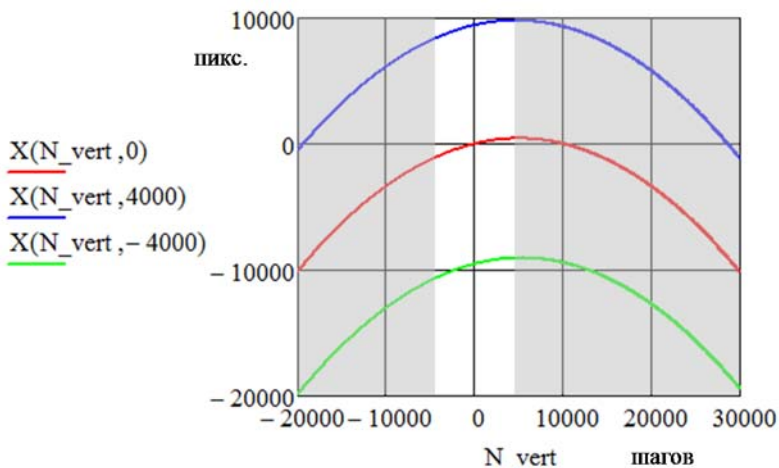


Рис. 4. Графики зависимости $X(N_{vert}, N_{gor} = const)$ при трех фиксированных значениях N_{gor}

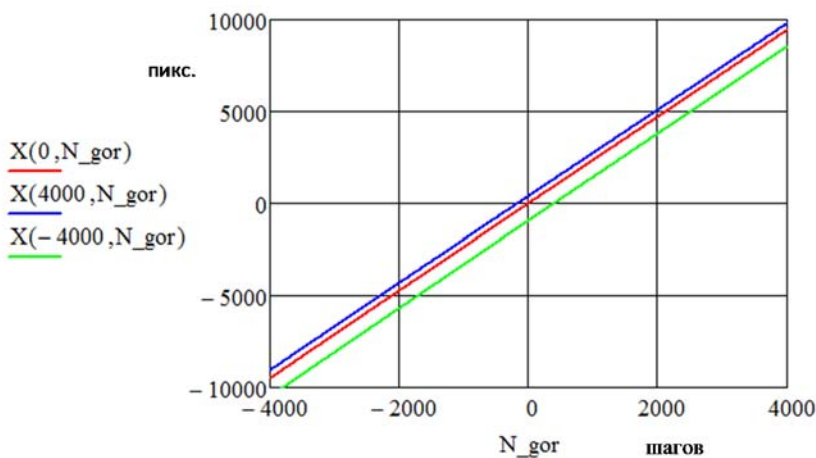


Рис. 5. Графики зависимости $X(N_{vert} = const, N_{gor})$ при трех фиксированных значениях N_{vert}

ствуют предельным значениям смещения горизонтального толкателя ± 4000 шагов.

На рис. 5 представлены зависимости координаты X лазерного пятна на матрице цифровой камеры в пикселях, в зависимости от числа шагов приводов толкателей оправы, представляет собой поверхность, представленную на рис. 6.

Синий и зеленый графики соответствуют предельным значениям смещения вертикального толкателя ± 4000 шагов.

Представление функций $X()$ в виде ряда с точностью до существенных слагаемых, показало, что зависимость $X(N_{vert}, N_{gor})$ в диапазоне ± 50000 шагов записывается в виде

$$X_{\text{пикс}}(N_{vert}, N_{gor}) = -1,69 \cdot 10^{-5} \cdot (N_{vert})^2 + 0,167 \cdot N_{vert} + 2,36 \cdot N_{gor}. \quad (3)$$

По выражению (3) видим, что основной вклад в значение $X()$ вносит смещение горизонтального толкателя (N_{gor}), наряду с этим выявлена слабая квадратичная зависимость при отличном от нуля смещении вертикального толкателя (N_{vert}), что продемонстрировано на рис. 3, 4.

Результат расчета координаты Y лазерного пятна на матрице цифровой камеры в пикселях, в зависимости от числа шагов приводов толкателей оправы, представляет собой поверхность, представленную на рис. 6.

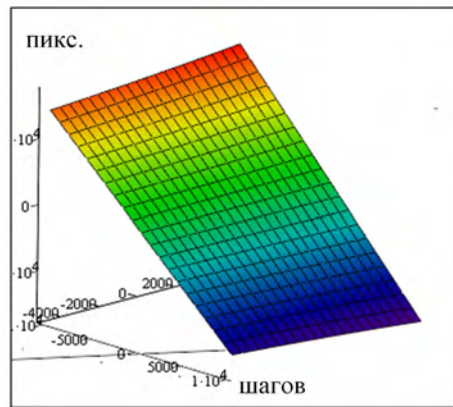


Рис. 6. Зависимость координаты лазерного пятна $Y(N_{vert}, N_{gor})$ на матрице цифровой камеры при смещении вертикального и горизонтального толкателей

На рис. 6 видим, что в координатах $Y0 N_{vert}$ при фиксированном значении N_{gor} зависимость $Y(N_{vert})$ линейная, но при изменении значения N_{gor} угол наклона линейной зависимости $Y(N_{vert})$ – изменяется; в координатах $Y0 N_{gor}$ при фиксированном значении N_{vert} зависимость $Y(N_{gor})$ также линейная, но при изменении значения N_{vert} угол наклона линейной зависимости $Y(N_{gor})$ – также изменяется.

На рис. 7 представлены зависимости координаты Y лазерного пятна на матрице цифровой камеры при воздействии только на вертикальный толкатель оправы $Y(N_{vert}, N_{gor} = const)$. Синий и зеленый графики соответствуют предельным значениям смещения горизонтального толкателя.

На рис. 8 представлены зависимости координаты Y лазерного пятна на матрице цифровой камеры при воздействии только на вертикальный толкатель оправы $Y(N_{vert} = const, N_{gor})$. Синий

и зеленый графики соответствуют предельным значениям смещения горизонтального толкателя.

Представление функций Y рис. 8 в виде ряда с точностью до существенных слагаемых, имеет вид:

$$Y_{\text{пикс}}(N_{vert}, N_{gor}) = -2,47 * 10^{-5} * N_{vert} * N_{gor} - 1,56 * N_{vert}. \quad (4)$$

Выражение (4) демонстрирует, что зависимость $Y()$ линейна по N_{vert} и N_{gor} . Основной вклад вносит смещение вертикального толкателя (N_{vert}), наряду с этим выявлена зависимость от величины и направления смещения горизонтального N_{gor} , что и продемонстрировано на рис. 6, 7, 8.

В случае, когда расстояние от поверхности поворотного зеркала до матрицы цифровой камеры составляет 464 мм, плечо толкателя оправы – $h_{\text{толкателя}} = 79$ мм, расстояние от поворотного шарни-

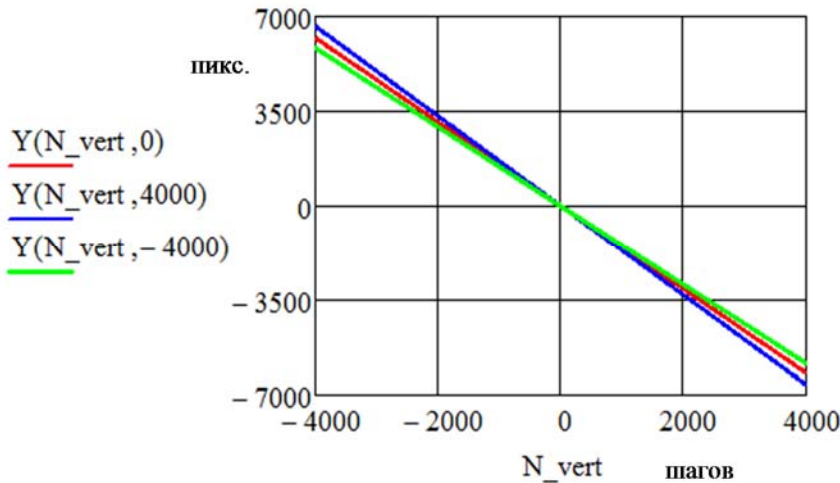


Рис. 7. Графики зависимости $Y(N_{vert}, N_{gor})$ при трех фиксированных значениях N_{gor}

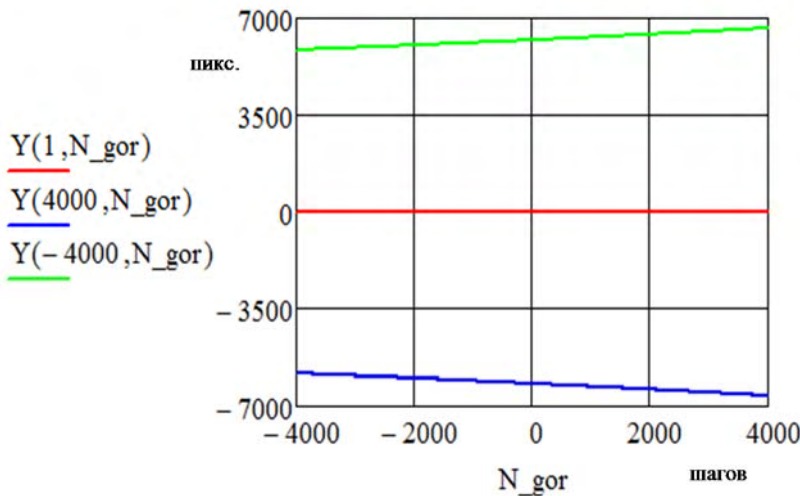


Рис. 8. Графики зависимости $Y(N_{vert}, N_{gor})$ при трех фиксированных значениях N_{vert}

ка оправы до плоскости зеркала – $H = 20$ мм, значения координат лазерного пятна на матрице цифровой камеры при воздействии на толкатели оправы поворотного зеркала рассчитываются по формулам:

$$Y_{\text{пикс}}(N_{\text{vert}}, N_{\text{gor}}) = -2,47 \cdot 10^{-5} \cdot N_{\text{vert}} \cdot N_{\text{gor}} - 1,56 \cdot N_{\text{vert}}. \quad (5.1)$$

$$X_{\text{пикс}}(N_{\text{vert}}, N_{\text{gor}}) = -1,69 \cdot 10^{-5} \cdot (N_{\text{vert}})^2 + 0,167 \cdot N_{\text{vert}} + 2,36 \cdot N_{\text{gor}}. \quad (5.2)$$

В формулах (5.1)–(5.2) обозначим коэффициенты перед переменными следующими буквами: $A = 2,47 \cdot 10^{-5}$; $B = 1,56$; $C = 1,69 \cdot 10^{-5}$; $D = 0,167$; $E = 2,36$. В результате

$$Y_{\text{пикс}}(N_{\text{vert}}, N_{\text{gor}}) = -A \cdot N_{\text{vert}} \cdot N_{\text{gor}} - B \cdot N_{\text{vert}}. \quad (5.3)$$

$$X_{\text{пикс}}(N_{\text{vert}}, N_{\text{gor}}) = -C \cdot (N_{\text{vert}})^2 + D \cdot N_{\text{vert}} + E \cdot N_{\text{gor}}. \quad (5.4)$$

Для записи обратного преобразования и вычисления $N_{\text{vert}}(X, Y)$ и $N_{\text{gor}}(X, Y)$ выпишем вспомогательные выражения:

$$q(X, Y) = \frac{D}{C} \frac{AX+EB}{AC} + \frac{EY}{AC} - \frac{D}{4C}. \quad (5.5)$$

$$Q(X, Y) = \left[\frac{1}{3} \left(\frac{AX+EB}{AC} - \frac{D^2}{3C^2} \right) \right] + \left[\frac{1}{2} \left(\frac{D}{C} \frac{AX+EB}{AC} + \frac{EY}{AC} - \frac{D}{4C} \right) \right]. \quad (5.6)$$

тогда

$$N_{\text{vert}}(X, Y) = \sqrt[3]{\sqrt{Q} - \frac{q}{2}} + \sqrt[3]{-\sqrt{Q} - \frac{q}{2}}. \quad (5.7)$$

$$N_{\text{gor}}(X, Y) = \frac{X + CN_{\text{vert}}^2 - DN_{\text{vert}}}{E}. \quad (5.8)$$

Функции (5.7) и (5.8) позволят производить расчет величины сдвига толкателей поворотной оправы для смещения отраженного луча из точки с координатами (X, Y) в точку с требуемыми координатами $(X + \Delta X, Y + \Delta Y)$, что необходимо при использовании поворотного зеркала в системах автоматической юстировки.

Экспериментальная проверка расчетов

В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные данные смещения лазерного пятна по экрану при смещении толкателей оправы. Расстояние от середины зеркала до середины цифровой матрицы экрана 464 мм. Величина шага толкателей составляет 1,25 мкм, значения ΔX и ΔY в таблице приведены в пикселях цифровой матрицы.

Размер пикселя 6,7 мкм. В экспериментах точность определения координат лазерного пятна на экране составляла $\pm 0,5$ пикселя матрицы цифровой камеры.

При воздействии на вертикальный толкатель относительное расхождение экспериментальных и расчетных значений в смещении лазерного пятна по экрану ΔY составляет 1,3 % и менее. При этом относительное расхождение экспериментальных и расчетных значений в смещении лазерного пятна по экрану ΔX может достигать до 18 %. Важно отметить, что большие расхождения в значениях ΔX наблюдаются только при движении лазерного луча вверх, когда толкатель сдвигает оправу на 100–200 шагов. Когда толкатель сдвигает оправу так, что луч движется по экрану вниз различие в экспериментальных и расчетных значениях – ΔX – составляет 1÷6 %.

Таблица 1

Шагов		Расчет [pix]		Эксперимент [pix]		Относительная погрешность [%]	
Vert	Gor	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY
-100	0	-17	155	-14÷-20	154÷157	$\pm 17,6$ %	$\pm 1,3$ %
-200	0	-34	310	-40	311	17,6 %	0,3 %
-300	0	-52	465	-54	468	3,8 %	0,65 %
+100	0	16,5	-155	15÷17	-155	6,3 %	0
+200	0	33	-310	32	-311	3 %	0,3 %
+300	0	48,5	-465	48	-468	1 %	0,65 %
0	+50	118	0	120	2÷3	1,7 %	
0	+200	471	0	485	2÷3	3 %	
0	+250	590	0	606	2÷3	2,7 %	
0	-100	-236	0	242	2	2,5 %	
0	-150	-358	0	-365	3	2 %	
0	-250	-590	0	-605	2	2,5 %	

Есть предположение, что это связано с несовершенством кинематики оправы, когда воздействии по одной координате оправы приводит и к микроскопическим воздействиям на толкатель другой координаты.

При воздействии на горизонтальный толкатель относительное расхождение экспериментальных и расчетных значений в смещении лазерного пятна по экрану ΔX в пределах $2 \div 3$ %. При этом в эксперименте наблюдается также небольшое вертикальное смещение лазерного пятна по экрану (единицы пикселей), которого не должно быть по расчетам. Можно предположить, что это связано с несовершенством кинематики оправы.

Таким образом, получены соответствия между расчетными и экспериментальными данными движения лазерного луча по экрану после отражения от поворотного зеркала.

Заключение

Создана математическая модель управления зеркалом, закрепленным в поворотной оправе со смещенной осью поворота. Обнаружено, что,

в общем случае, при воздействии только на вертикальный или только на горизонтальный толкатель поворотной оправы с закрепленным на ней зеркалом, происходит изменение углов отражения одновременно в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Получены зависимости смещения пятна лазерного луча по экрану при отражении от поворотного зеркала. Решена задача расчета величины сдвига толкателей поворотной оправы для смещения отраженного луча в точку с требуемыми координатами $(X + \Delta X, Y + \Delta Y)$. Экспериментальная проверка на стенде показала хорошее соответствие расчетных предсказаний и соответствующих им экспериментальных данных. Полученные расчетно-экспериментальные наработки будут использованы в создании автоматической системы заведения луча ЗГ в усилительный тракт лазерной установки нового поколения.

Список литературы

1. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Аналитическая геометрия. – М.: «Наука», 1968. 232 с.