

УДК 535.5

Д. А. Безуглов

*(Ростов-на-Дону)***МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ АПРИОРНО ЗАДАННОГО ЗАКОНА  
СКАНИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ОТКЛОНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ЛУЧА**

Предложен новый метод обеспечения априорно заданного закона сканирования в системе отклонения оптического луча на базе пьезоэлектрического дефлектора, работающего на резонансной частоте.

**Введение.** Для решения задачи пространственного отклонения оптического луча в случаях, требующих изменения его углового положения, часто используют различные типы пьезоэлектрических дефлекторов. Вне зависимости от их конструкции максимальная угловая амплитуда сканирования будет наблюдаться при частоте питающего напряжения, соответствующей резонансной частоте колебаний дефлектора, которая зависит от геометрических размеров и механических постоянных материалов пьезоэлектрика.

Особенностью пьезоэлектрического дефлектора является то, что на частотах, близких к резонансным, достаточно просто реализовать закон сканирования в виде

$$H(t) = H_{\max} \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $H_{\max}$  — максимальная величина линейного отклонения в плоскости сканирования;  $\omega$  — круговая частота.

Во многих случаях в различных оптических системах требуется получить априорно заданный закон сканирования (например, линейный, квадратичный).

Линейный закон сканирования будем описывать выражением

$$H_n(\omega t) = \begin{cases} \omega t & \text{при } \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2}; \\ (\pi - \omega t) & \text{при } \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \pi; \\ -(\pi + \omega t) & \text{при } \pi \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Квадратичному закону сканирования соответствует выражение

$$H_k(\omega t) = (\omega t)^2 \quad \text{при } -\pi \leq \omega t \leq \pi. \quad (3)$$

Обеспечить линейное изменение геометрических размеров пьезоэлемента можно только на низких частотах сканирования  $f$  при выполнении условия

$$f < f_p, \quad f = \frac{\omega}{2\pi}, \quad (4)$$

где  $f_p$  — частота первого резонанса пьезокерамики.

При увеличении частоты управляющего напряжения  $f$  (уменьшении длительности управляющего сигнала) отклик пьезокерамики становится отличным от формы управляющего напряжения. Этот факт можно объяснить тем, что пьезоэлемент является распределенной колебательной системой и при воздействии достаточно широкополосного сигнала управления он возбуждается на частотах своего механического резонанса, находящихся в спектре сигналов управления. При этом для получения априорно заданной точной формы отклика, отличной от синусоидальной, пьезоэлемент должен возбуждаться на частотах  $N\omega$  при  $N \rightarrow \infty$ . При наличии в спектре управляющего сигнала ограниченного числа гармоник  $N$  закон сканирования будет реализовываться с ошибкой.

Точность реализации закона сканирования будет определяться следующим выражением:

$$\Delta H(N) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} (E(\omega t) - H_N(\omega t)) d\omega t, \quad (5)$$

где  $H_N(\omega t)$  — закон сканирования с учетом ограничения числа членов ряда Фурье  $N$  членами.

В выражении (5) ошибка усредняется за половину периода. Это связано с тем, что рассматриваемый дефлектор совершает полное колебание в одну сторону. За вторую половину периода луч должен вернуться в исходное состояние. При этом если ошибки на этих двух половинах периода окажутся равны и противоположны по знаку, то при интегрировании за весь период величина  $\Delta H(N)$  окажется равна нулю, что не будет соответствовать действительности.

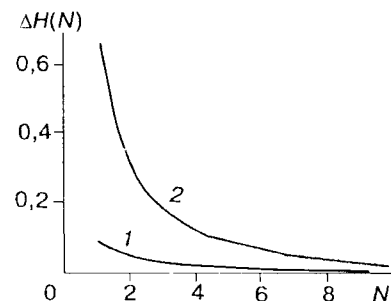
Результаты расчетов в соответствии с выражением (5) для законов сканирования вида (2), (3), выполненные с использованием известного разложения  $H_n(\omega t)$ ,  $H_k(\omega t)$  в ряд Фурье, приведены на рис. 1. Здесь и в дальнейшем все расчеты проведены с использованием математического пакета MathCAD 6.0 Plus.

Анализируя рис. 1, можно видеть, что для обеспечения точности сканирования по заданному закону, отличному от синусоидального, в пределах  $1 \div 2\%$  необходимо выполнить условие (4).

Аналогичные расчеты можно сделать и для других законов сканирования. Таким образом, в спектре управляющего сигнала должно содержаться достаточно большое число гармонических составляющих. Вследствие этого создание быстродействующих устройств сканирования оптического излучения, реализующих априорно заданный закон сканирования на известных принципах, проблематично.

В данной работе предложен принципиально новый подход к решению задачи реализации априорно заданного закона сканирования, позволяющий значительно повысить быстродействие систем отклонения оптического луча с пьезоэлементами и основанный на предварительном расчете специальной формы управляющего зеркала. При этом сам пьезоэлемент дефлектора будет совершать колебания на резонансной частоте, т. е. его колебания будут описываться выражением (1).

Рис. 1. Зависимость ошибки от числа гармоник в спектре управляющего сигнала: кривая 1 — линейный закон сканирования, кривая 2 — квадратичный закон сканирования





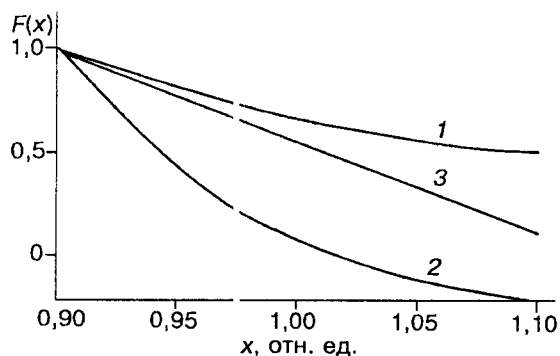


Рис. 3. Рассчитанная форма зеркала:  
кривая 1 — для линейного, кривая 2 — для квадратичного и кривая 3 — для синусоидального закона сканирования

Выражение (12) описывает геометрию задачи в статике. С учетом того, что максимальная амплитуда отклонения пьезоэлемента может быть получена на резонансной частоте, рассмотрим случай, когда зеркало совершает возвратно-поступательное движение по закону

$$x(t) = x_0 + a \cos \omega t, \quad (13)$$

где  $a$  — амплитуда отклонения луча;  $x_0$  — расстояние от луча до плоскости сканирования.

Физический смысл выражения (13) состоит в том, что зеркало смещается строго параллельно оси  $x$ . В этом случае в соответствии с правилами преобразования координат выражение (12) запишется в виде

$$F'(x) = \left\{ H \left[ \frac{1}{\omega} \arccos \left( \frac{x(t) - x_0}{a} \right) \right] - F(x) \right\} \frac{1}{x} - \left( \left\{ H \left[ \frac{1}{\omega} \arccos \left( \frac{x(t) - x_0}{a} \right) \right] - F(x) \right\}^2 \frac{1}{x^2} + 1 \right)^{1/2}, \quad (14)$$

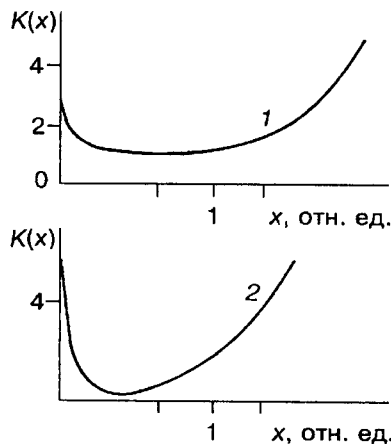
где

$$t = \frac{1}{\omega} \arccos \left( \frac{x(t) - x_0}{a} \right).$$

Знак « $\rightarrow$ » подкоренного выражения выбран исходя из физического смысла. При знаке « $\leftarrow$ » решения будут комплексными. Для того чтобы получить аналитическое выражение, описывающее форму зеркала 2, необходимо проинтегрировать выражение (14) в пределах, по крайней мере,  $x_0 - a \div x_0 + a$  при заданных начальных условиях:

$$F(x) = \int_{x_0-a}^{x_0+a} F'(x) dx. \quad (15)$$

Рис. 4. Кривизна  $K(x)$  рассчитанных зеркал:  
кривая 1 — линейный закон сканирования, кривая 2 — квадратичный закон сканирования



Интегрирование выражения (15) целесообразно проводить численным методом по следующей схеме:

$$\begin{aligned} F(x_{i+1}) &= F(x_i) + F'(x_i)\Delta x, \\ F'(x_i) &= -A - \sqrt{A^2 + 1}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$A = \frac{H_0 - H \left[ \frac{1}{\omega} \arccos \left( \frac{x(t) - x_0}{a} \right) \right] - F(x_i) - F'(x_{i-1})\Delta x}{x_i + \Delta x}.$$

**Пример.** Пусть необходимо рассчитать форму отражающей поверхности зеркала для обеспечения линейного (2) и квадратичного (3) законов сканирования при следующих начальных условиях:  $F(x_0) = 1$ ,  $F'(x_0) = -1$ ,  $\beta = 135^\circ$ ,  $a = 0,1$ ,  $x_0 = 1$ . Это соответствует расположению зеркала под углом  $45^\circ$  к лучу источника света. Форма зеркала, рассчитанная в соответствии с выражением (16), приведена на рис. 3. Там же изображена форма зеркала, рассчитанная предложенным методом для обеспечения синусоидального закона сканирования. При этом форма зеркала оказалась плоской, что позволяет сделать вывод о достоверности метода.

На рис. 4 приведены результаты расчетов кривизны зеркал.

#### ВЫВОДЫ

Достоинством предложенного метода является то, что пьезоэлемент системы сканирования работает на резонансной частоте. Это позволяет существенно упростить устройство управления и обеспечить максимальную амплитуду сканирования. Закон сканирования может быть задан априорно аналитически или, что иногда, несомненно, важно, таблично. Очевидно, что интегрирование выражения (16) в этом случае не представляет труда. На базе предложенного метода разработаны соответствующие устройства для сканирования оптического излучения [2, 3].

Наряду с достоинствами, рассмотренный дефлектор обладает также и недостатками. «Платой» за возможность обеспечения априорно заданного закона сканирования является кривизна зеркала и, как следствие, некоторая расходимость излучения и абберрации пучка. Однако в тех случаях, когда к дефлектору предъявляются в основном требования обеспечения априорно заданного закона сканирования, предложенный подход вполне обоснован.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по лазерной технике /Под ред. Ю. В. Байбородина, Л. З. Криксунова, О. Н. Литвиненко. Киев: Техника, 1978.
2. Пат. 2043646 РФ. Устройство отклонения луча /Д. А. Безуглов, Е. Н. Мищенко, О. В. Серпенинов. Оpubл. 24.04.92.
3. Положительное решение на заявку 5037672/10/018266. Устройство параллельного сканирования /Д. А. Безуглов, Е. Н. Мищенко. Принято 15.04.92.

*Поступила в редакцию 26 июля 1996 г.*