

Слободян С.А., Енчев С.В. (НАУ, Україна)

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

В статье рассмотрены прецизионные методы измерения параметров вибрации с помощью лазерных измерительных систем. Проведен анализ работы одноканальной двухчастотной и двухканальной одночастотной лазерных систем измерения угловых колебаний со сканирующим устройством.

Современное развитие лазерной техники, появление лазерных измерительных систем позволяет осуществлять точные прецизионные измерения параметров вибрации. Для авиационной отрасли перспективным является измерение параметров вибрации авиационного двигателя в условиях авиаремонтного завода, а также проверка систем и блоков на вибропрочность – этап доводки и испытаний.

Принцип измерения вибрации с помощью лазерных измерительных систем заключается в измерении параметров угловых колебаний объекта измерения с помощью сканирующих устройств. Когерентное излучение. Выходящее из точки А (рис.1), лежащей на оси  $z$ , описывает круговую траекторию в плоскости  $xOy$  объекта. Если плоскость  $xOy$  перпендикулярна оси  $z$ , то путь, проходимый излучением от точки А до плоскости  $xOy$ , при сканировании не изменяется.

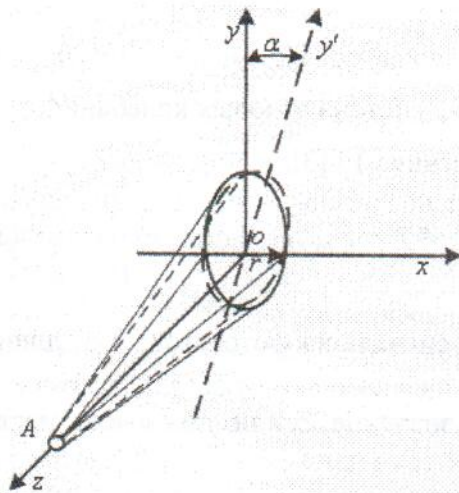


Рис.1. Пояснение принципа измерения угловых колебаний с помощью сканирующих устройств

При отклонении плоскости  $xOy$  от первоначального положения на угол  $\alpha$  путь, проходимый излучением при сканировании плоскости  $xOy$  по окружности радиуса  $r$ , изменяется на величину  $s$  в соответствии с зависимостью

$$s = E_m \sin(\omega_1 t + \varphi), \quad (1)$$

где  $E_m = r \cdot \operatorname{tg} \alpha$  – амплитуда изменения оптического пути излучения;  $\omega_1$  – угловая частота сканирования излучения;  $\varphi$  – начальная фаза.

Скорость изменения оптического пути, эквивалентная скорости относительного движения точки А и точки, движущейся в плоскости  $x'y'$ ,

$$V = \frac{ds}{dt} = \omega_1 r \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi).$$

При приеме излучения, отраженного от плоскости  $xOy$ , возникает доплеровский сдвиг частоты

$$\omega_d = \frac{2\omega_1 \omega r \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi)}{c}. \quad (2)$$

В качестве дефлекторов можно использовать непрерывные преломляющие дефлекторы кругового сканирования, основанные на применении прямоугольных призм.

Рассмотрим особенности измерения угловых колебаний в двухчастотной лазерной измерительной системе со сканирующим устройством [1, 2]. Излучение лазера 1 (рис. 2), пройдя через электрооптический преобразователь, состоящий из двух четвертьволновых пластин 2,5, электрооптического кристалла 3, формирователя 4, делится светоделительным кубиком 6 на две части. Одна часть через поляризатор 9, дефлектор 10, неподвижные отражатели 11, 12 направляется на объект измерения 13, совершающий угловые колебания. Радиус окружности сканирования  $r = L \cdot \operatorname{tg} \gamma$ , где  $L$  – расстояние от дефлектора до объекта;  $2\gamma$  – угол при вершине, описываемый сканирующим из-

лучением. Отраженный от объекта 13 оптический сигнал направляется на оптическую систему 14 и поляризатор 16 под углом  $\gamma + 2\alpha \cdot \sin(\omega_1 t + \varphi)$  и совмещается с помощью светоделительного кубика 15 с опорным оптическим сигналом, прошедшим поляризатор 7 и расширитель 8.

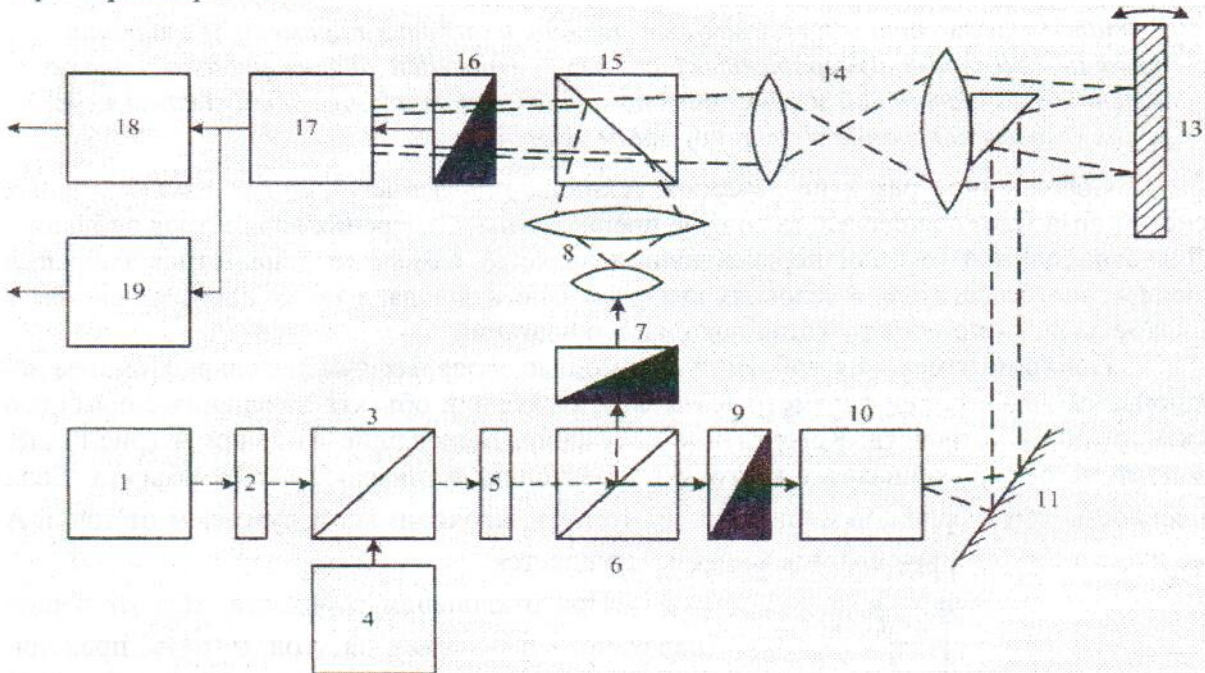


Рис.2. Двухчастотная лазерная измерительная система угловых колебаний.

Переменная составляющая на выходе фотоприемника 17 [3]:

$$u = U \frac{\sin \frac{a\pi}{\lambda} \cdot \sin \alpha_1}{\frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha_1} \cos \left[ \Omega t + \frac{4\pi r \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \cdot \sin \omega_1 t \right], \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  – угол падения измерительного оптического сигнала на фотокатод;  $\lambda$  – длина волны.

Как следует из выражения (3), максимальное значение амплитуды имеет место при значении:

$$U^* = \frac{\sin \frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha_1}{\frac{a\pi}{\lambda} \sin \alpha_1} = 1, \text{ при } \alpha_1 = 0. \quad (4)$$

Этот случай соответствует идеальному пространственному совмещению опорного и измерительного оптических сигналов. В реальных системах при сканировании поверхности объекта измерительный оптический сигнал, сфокусированный на чувствительную поверхность фотоприемника, движется по образующей телесного угла, ось которого составляет угол  $\beta$  с нормалью к чувствительной поверхности. Угловая совместимость излучения отраженного от объекта измерения с помощью оптики 14 (рис. 2) уменьшается  $K$  раз.

В этом случае переменная составляющая выходного сигнала фотоприемника [2] примет вид

$$u = K_{\text{фл}} E_0 E_1 \frac{\sin \frac{a\pi}{\lambda} \sin \left[ (\beta - \alpha_1) + \frac{2\alpha \sin(\omega_1 t + \varphi)}{K} \right] \cdot \cos \left[ \Omega t + \frac{4\pi r \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \sin \omega_1 t \right]}{\frac{a\pi}{\lambda} \sin \left[ (\beta - \alpha_1) + \frac{2\alpha \sin(\omega_1 t + \varphi)}{K} \right]}. \quad (5)$$

Азимут наклона поверхности объекта определяется значением фазы  $\varphi$ . Величина фазы  $\varphi$  входит в выражение (5) и может быть найдена путем сравнения с фазой электрического сигнала сканирования частотой  $\omega_1$ , подаваемого на вход дефлектора. Кроме того, значение фазы  $\varphi$  в соответствии с выражением (2) входит в выражение (3) и определяет фазу амплитуды девиации частоты. При значении  $\Omega \neq 0$  величина фазы  $\varphi$  может быть получена путем демодуляции частотно-модулированного сигнала (3) и сравнения фазы полученного сигнала с фазой сигнала управления дефлектором. При значении  $\Omega = 0$  значение фазы  $\varphi$  находится путем непосредственного сравнения фазы сигнала частоты  $\omega_1$  (выходного сигнала фотоприемника) с фазой сигнала управления дефлектором. Таким образом, выходной сигнал полосового фильтра 18, имеющего центральную частоту  $\Omega$ , описывается выражением

$$u = UJ_0(m_f) \cos \Omega t, \quad (6)$$

где  $m_f = \frac{4\pi r \cdot \text{tg} \alpha}{\lambda}$  – значение индекса частотной модуляции;  $J_0(m_f)$  – функция Бесселя нулевого порядка аргумента  $m_f$ .

Угловое смещение объекта находится по формуле

$$\alpha_m = \arctg \left[ \frac{\lambda (m_f)_m}{4\pi r} \right], \quad (7)$$

где  $(m_f)_m$  – значения индекса частотной модуляции, соответствующие корням  $J_0(m_f)_m = 0$ .

Особенности использования для измерения параметров угловых колебаний многоканальных систем с частотной модуляцией рассмотрим на примере двухканальной системы со сканирующим устройством для контроля угловых смещений по двум координатам [3].

Излучение лазера 10 (рис. 3) в первом канале проходит через четвертьволновые пластины 11, 14 электрооптический кристалл 12, питаемый формирователем 13, поляризатор 15, дефлектор 16, неподвижные отражатели 17, 19, а во втором канале – через четвертьволновые пластины 29, 26, электрооптический кристалл 27, питаемый от формирователя 28, поляризаторы 25, 30, дефлектор 24 и неподвижный отражатель 21. Отраженные от объекта измерения 20 оптические сигналы с частотами  $\omega - \Omega_1$ ,  $\omega - \Omega_2$  через оптические системы 18, 22, неподвижные зеркала 16, 23, 31 светоделительные кубики 8, 9 и поляризатор 7 направляются на фотоприемник 6, туда же поступает и оптический сигнал с частотой  $\omega$ .

Выходной сигнал фотоприемника поступает на полосовой фильтр 5, узкополосные фильтры 1,3 и частотные детекторы 2,4.

Переменная составляющая напряжения на выходе фотоприемника без учета паразитных спектральных составляющих имеет [3]

$$u = K_{\text{фп}} E_0 E_1 \frac{\sin \left\{ \frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0) \right\}}{\frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0)} \cdot \cos \left[ \Omega_1 t + \frac{4\pi}{\lambda} r \cdot \text{tg} \alpha \cdot \sin \omega_1 t \right] + \\ + K_{\text{фп}} E_0 E_1 \frac{\sin \left\{ \frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_0) \right\}}{\frac{a\pi}{\lambda} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_0)} \cdot \cos \left[ \Omega_2 t + \frac{4\pi}{\lambda} r \cdot \text{tg} \alpha' \cdot \sin \omega_1 t \right]. \quad (8)$$

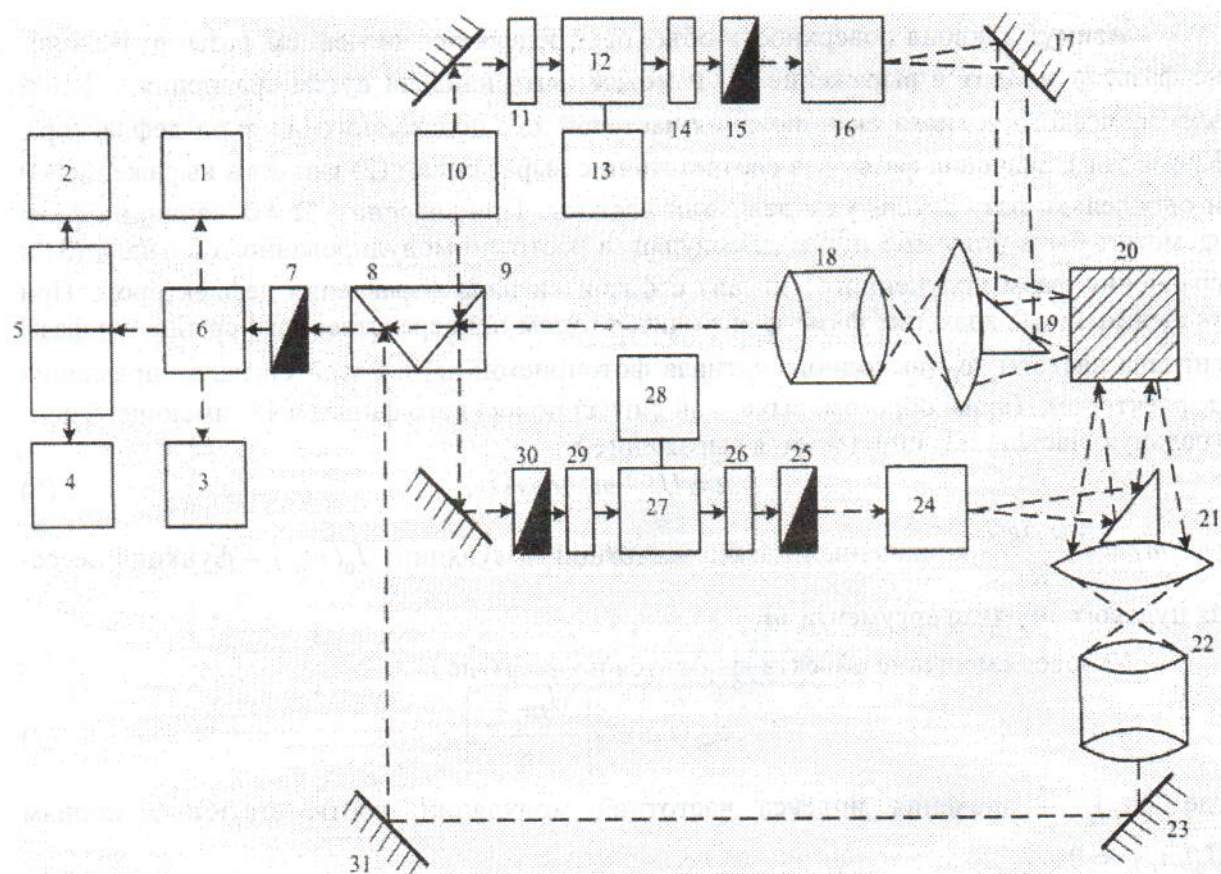


Рис.3. Двухканальная лазерная система измерения угловых колебаний.

Для разделения несущих частот используются полосовые фильтры 5. Напряжения на выходе узкополосных фильтров 1,3

$$u_{\phi 1} = UJ_0 \left( \frac{4\pi r \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\lambda} \right) \cos \Omega_1 t; \quad (9)$$

$$u_{\phi 2} = UJ_0 \left( \frac{4\pi r \cdot \operatorname{tg} \alpha'}{\lambda} \right) \cos \Omega_2 t.$$

Угловые смещения объекта находим по формуле (7). Значение максимальной частоты на выходе фотоприемника определяет быстродействие устройств выходного сигнала фотоприемника.

Максимальное значение контролируемого углового смещения объекта определяется апертурой приемной оптической системы, расстоянием до объекта измерения, углом падения сканирующего излучения на поверхность объекта и лежит в пределах нескольких градусов.

#### Список литературы

1. *Застрогин Ю.Ф.* Контроль параметров движения с использованием лазеров: Методы и средства. М.: Машиностроение, 1981. – 176 с.
2. *Королев А.М.* Модуляционные методы измерения параметров механических колебаний. Автореферат дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – М.: МВТУ им. Баумана, 1981. – 36 с.
3. *Застрогин Ю.Ф.* Прецизионные измерения параметров движения с использованием лазера. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.
4. *Вагнер Е.Т., Митрофанов А.А., Барков В.Н.* Лазерные и оптические методы контроля в самолетостроении. – М.: Машиностроение, 1976. – 176 с.