

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Коронкевич В. П. и др.** Киноформные оптические элементы — методы расчета: технология изготовления, практическое применение.— Автометрия, 1985, № 1, с. 3—24.
2. **Фотолиитография и оптика/Под ред. Я. А. Федотова и Г. Поля.**— М.: Сов. радио, 1974.
3. **Biedermann K., Holmgren O.** Large-size distortion-free computer-generated holograms in photoresist.— Appl. Opt., 1977, v. 16, N 8, p. 2014—2016.
4. **Koronkevich V. P. e. a.** Fabrication of kinoform optical element.— Optik, 1984, Bd 67, N 3, S. 259—266.
5. **Левинсон Г. Р., Смилга В. И.** Лазерная обработка тонких пленок (обзор).— Квант. электроника, 1976, т. 3, № 8, с. 1637—1659.
6. **Седухин А. Г.** Анализ помехозащищенности процесса формирования круговых шкал при сканирующем способе записи.— ОМП, 1984, № 12.
7. **Введение в фотолиитографию/Под ред. В. П. Лаврищева.**— М.: Энергия, 1977.
8. **Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома.— Квант. электроника, 1985, т. 12, № 4, с. 755—761.
9. **Haskal H. M., Rosen A. N.** Power and focusing considerations for recording with a laser in the TEM<sub>00</sub> mode.— Appl. Opt., 1971, v. 10, N 6, p. 1354—1358.
10. **Макухин В. П., Савельев В. А.** Лазерные методы получения и обработки тонких пленок (обзор).— Зарубеж. радиоэлектроника, 1977, № 1, с. 30.
11. **Kubo T. e. a.** Investigations of holes mached by laser beam on Al and Cr thin films.— J. Appl. Phys., 1982, v. 53, N 4, p. 3231—3236.
12. **Пат. 4123780 (США).** Устройство для фильтрации помех в системе записи при помощи луча лазера.— Опубл. 31.10.78.
13. **Lager H. P.** Acoustooptic modulator intensity servo.— Appl. Opt., 1979, v. 18, N 17, p. 2905.
14. **Корольков В. П., Полещук А. Г.** Оптико-электронная система модуляции и стабилизации лазерного излучения.— В кн.: Тез. докл. Всесоюз. конф. «Робототехника и автоматизация производственных процессов». Барнаул, 1983, ч. 3, с. 56.
15. **Полещук А. Г., Химич А. К.** Устройство для линейного управления и стабилизации мощности излучения лазера акустооптическим модулятором.— ОМП, 1980, № 9, с. 36.
16. **The Bipolar Microcomputer Components Data Book for Design Engineers.**— Dallas, 1977, p. 7—294.

*Поступила в редакцию 11 июля 1985 г.*

УДК 531.792.2 : 621.822.57

**А. Г. СЕДУХИН**  
(Новосибирск)

### **ВЛИЯНИЕ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТИ ВАЛА ШПИНДЕЛЯ С АЭРОСТАТИЧЕСКИМИ ПОДШИПНИКАМИ НА ТОЧНОСТЬ СИНТЕЗА КРУГОВЫХ ШКАЛ**

При синтезе структуры круговых шкал на лазерном фотопостроителе, работающем в полярной системе координат [1], важно знать степень влияния, оказываемого на процесс записи различными дестабилизирующими факторами. Одним из существенных факторов, характерных для сканирующего способа записи шкал [2], является неуравновешенность вала шпинделя фотопостроителя. В шпинделе с аэростатическими подшипниками статический и динамический дисбаланс вала вызывают пространственные колебания оси вала относительно оси вращения. По этой причине в подшипниках возникают паразитные гармоники момента сопротивления вращению, которые проявляются в неравномерности скорости вращения вала и в процессе синтеза косвенно (через электронные и оптико-механические узлы фотопостроителя) влияют на точность нанесения углового положения штрихов круговых шкал.

В настоящей работе оценивается влияние неуравновешенности вала шпинделя с аэростатическими подшипниками на точность синтеза кру-

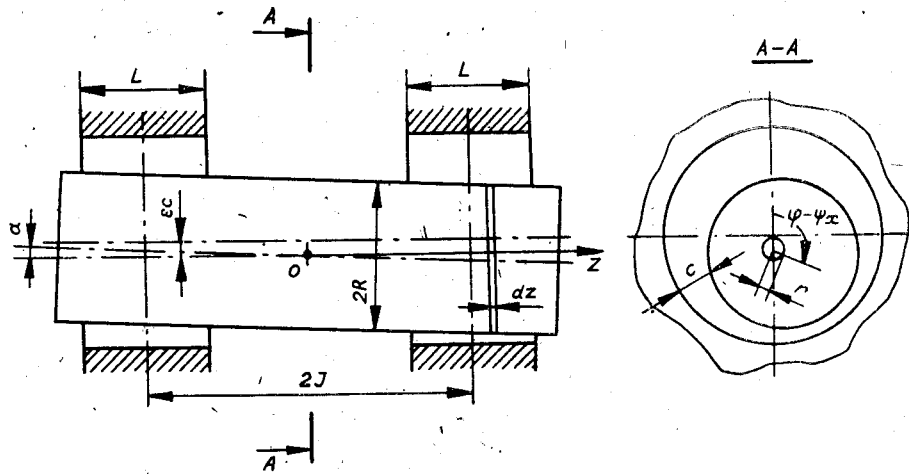


Рис. 1.

говых шкал. На рис. 1 упрощенно показан разрез шпинделя с горизонтальным расположением вала и двумя радиальными аэроэластическими подшипниками. Момент сопротивления вращению вала, вызываемый вязким трением в подшипниках, определяется для каждого подшипника формулой [3]

$$M_{\pi} = 2\pi\mu\Omega R^3 L / c\sqrt{1 - \epsilon^2}, \quad (1)$$

где  $\mu$  — вязкость воздуха;  $\Omega$  — средняя угловая скорость вращения вала;  $R$  — радиус вала;  $L$  — длина подшипника;  $c$  — средний радиальный зазор между подшипником и валом;  $\epsilon = mg/2cG$  — относительный эксцентриситет оси вала;  $m$  — масса вала;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $G$  — радиальная жесткость одного подшипника. Заметим, что формула (1) справедлива при относительно больших скоростях вращения вала. Для малых скоростей необходимо дополнительно учитывать поправочный коэффициент трения противотока.

При статическом дисбалансе вала шпинделя из-за влияния центробежной силы геометрическая ось вала будет перемещаться относительно оси его вращения по цилиндрической поверхности, имеющей радиус

$$r = X\Omega^2 / g(2G - m\Omega^2), \quad (2)$$

где  $X$  — амплитуда статического дисбаланса. Эксцентриситет оси вала приводит к появлению изменяющегося в течение каждого оборота вала момента вращения:

$$M_c^1(t) = (X + mgr) \sin(\Omega t - \psi_x). \quad (3)$$

Здесь  $t$  — координата времени;  $\psi_x$  — фаза статического дисбаланса, рассматриваемая по отношению к текущей фазе  $\varphi = \Omega t$  углового положения вала. Изменится также момент сопротивления вращению. В соответствии с рис. 1 новое значение относительного эксцентриситета при статическом дисбалансе

$$\epsilon_c(t) = \sqrt{\epsilon^2 + r_0^2 - 2\epsilon r_0 \cos(\Omega t - \psi_x)}, \quad (4)$$

где  $r_0 = r/c$ . С учетом (1), (3), (4) полный момент сопротивления вращению представим суммой двух составляющих:

$$M_c(t) = M_c^2(t) - M_c^1(t) = \frac{4\pi\mu\Omega R^3 L}{c\sqrt{1 - \epsilon^2 - r_0^2 + 2\epsilon r_0 \cos(\Omega t - \psi_x)}} - (X + mgr) \sin(\Omega t - \psi_x). \quad (5)$$

Раскладывая первое слагаемое в ряд Фурье на интервале  $\varphi - \psi_x \in [0; 2\pi]$ , получим

$$M_c^2(t) = \frac{8\mu\Omega R^3 LK(k)}{c\sqrt{1-\varepsilon^2-r_0^2+2\varepsilon r_0}} \left\{ 1 + 2 \sum_{m,n=1}^{\infty} \left\{ 1 + \sum_{i=1}^n \frac{(-1)^i}{(2i)! 2^i} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \prod_{l=1}^i \frac{[4n^2 - (2l-2)^2](2l+2m-1)}{(l+m)} \right\} \cos n(\Omega t - \psi_x) \right\} \approx \frac{4\mu\Omega R^3 L}{c\sqrt{1-\varepsilon^2-r_0^2+2\varepsilon r_0}} \times \\ \times \left[ 1 + \frac{k^2}{4} - \frac{k^2}{4} \cos(\Omega t - \psi_x) + \frac{3k^4}{64} \cos 2(\Omega t - \psi_x) \right], \quad (6)$$

где  $k^2 = 4\varepsilon r_0 / (1 - \varepsilon^2 - r_0^2 + 2\varepsilon r_0)$ ;  $K(k)$  — полный эллиптический интеграл первого рода.

При наличии динамического дисбаланса ось вращающегося вала описывает в пространстве коническую поверхность. Момент силы  $M_{отк}$ , вызывающий отклонение оси вала относительно оси вращения, складывается из момента  $M_{дин}$ , обусловленного динамическим дисбалансом, и гироскопического момента  $M_{гир}$ :

$$M_{отк} = M_{дин} + M_{гир} = Y\Omega^2/g + (I_\xi - I_e) \sin(2\alpha)\Omega^2/\alpha, \quad (7)$$

где  $Y$  — амплитуда динамического дисбаланса;  $I_\xi$  и  $I_e$  — соответственно полярный и экваториальный момент инерции вала;  $\alpha$  — угол отклонения оси вала относительно оси вращения. Момент сопротивления отклонению  $M_{сопр}$  (восстанавливающий момент) находится по формуле [4]

$$M_{сопр} = 2G(J^2 + L^2/12) \sin \alpha, \quad (8)$$

где  $J$  — половинное расстояние между центрами подшипников шпинделя;  $L$  — длина одного подшипника. Приравнивая (7) и (8) и учитывая малость угла  $\alpha$ , получим

$$\alpha = Y\Omega^2/g[2G(J^2 + L^2/12) - (I_\xi - I_e)\Omega^2].$$

Для бесконечно тонкого сечения толщиной  $dz$  с координатой  $z$ , начало отсчета 0 которой совпадает с геометрическим центром вала, относительный эксцентриситет  $\varepsilon_z$  будет определяться выражением (4) при замене  $r_0$  на  $z \sin \alpha / c$  и фазы  $\psi_x$  на фазу динамического дисбаланса  $\psi_Y$ . Поэтому момент сопротивления вращению для одного из подшипников

$$M_g^1(t) = \int_{J-L/2}^{J+L/2} \frac{2\mu\Omega R^3 dz}{c\sqrt{1-\varepsilon^2 - \left(\frac{z}{c} \sin \alpha\right)^2 + 2\varepsilon \frac{z}{c} \sin \alpha \cdot \cos(\Omega t - \psi_Y)}} = \\ = \frac{c}{\sin \alpha} \left\{ \arcsin \left[ \frac{\left(J + \frac{L}{2}\right) \frac{\sin \alpha}{c} - \varepsilon \cos(\Omega t - \psi_Y)}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2(\Omega t - \psi_Y)}} \right] - \right. \\ \left. - \arcsin \left[ \frac{\left(J - \frac{L}{2}\right) \frac{\sin \alpha}{c} - \varepsilon \cos(\Omega t - \psi_Y)}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \sin^2(\Omega t - \psi_Y)}} \right] \right\}.$$

Для второго подшипника момент сопротивления вращению  $M_g^2(t)$  определяется таким же выражением при замене  $\varphi$  на  $\varphi + \pi$ . Представить результирующий момент сопротивления вращению  $M_g(t) = M_g^1(t) + M_g^2(t)$  в явном виде не удастся. Разложив  $M_g(t)$  в степенной ряд по  $\alpha$  и ограничившись в силу малости  $\alpha$  первыми тремя членами ряда, найдем

$$M_g(t) = M_0 \left\{ 1 + \frac{(J^2 + L^2/12)}{2c^2} \left[ \frac{2 + \varepsilon^2 + 3\varepsilon^2 \cos 2(\Omega t - \psi_Y)}{2(1-\varepsilon^2)^2} \right] \alpha^2 \right\}, \quad (9)$$

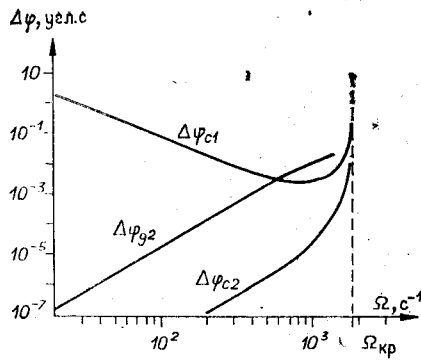


Рис. 2.

времени значение. На основании уравнения динамики вращения вала, записанного для установившегося режима

$$\sum_n M_n \sin(n\Omega t + \psi_n) = I_{\xi} d^2\varphi/dt^2$$

( $M_n, \psi_n$  — амплитуда и фаза  $n$ -й гармонической составляющей момента сопротивления вращению;  $n$  — индекс соответствующей гармоники), определим амплитуды гармоник «качаний» фазы углового положения вала:

$$\Delta\varphi_n = M_n/I_{\xi}(n\Omega)^2. \quad (10)$$

Для использованного нами шпинделя [1] на рис. 2 представлены графики частотной зависимости амплитуд «качаний» фазы углового положения вала, рассчитанные по уравнениям (10), (6), (9) принятых при минимальных амплитудах остаточных дисбалансов вала, равных  $X = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $Y = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$ . Обозначения  $\Delta\varphi_{с1}, \Delta\varphi_{с2}$  соответствуют амплитудам первой и второй гармоник «качаний» фазы углового положения вала вследствие остаточного статического дисбаланса, а через  $\Delta\varphi_{g2}$  обозначена амплитуда соответствующей второй гармоники, обусловленной динамическим дисбалансом. Из-за ограниченной жесткости подшипников вблизи критической частоты  $\Omega_{кр} = \sqrt{2G/m}$ , соответствующей обращению в нуль знаменателя выражения (2), наблюдается резкий рост графиков для  $\Delta\varphi_{с1}$  и  $\Delta\varphi_{с2}$ .

При работе на скоростях, существенно меньших  $\Omega_{кр}$ , и небольших величинах статического и динамического дисбалансов, что соответствует условиям

$$X \ll 2mg^2/\Omega^2;$$

$$Y \ll 2mg^2(J^2 + L^2/12)/J\Omega^2,$$

выражения (5), (6) и (9) можно упростить и привести к виду

$$M_c(t) = M_0 \left( 1 + \frac{X}{\eta} \right) - \frac{X}{\eta} \sqrt{\eta^2 + M_0^2} \sin \left[ \Omega t - \psi_X + \arctg \left( \frac{M_0}{\eta} \right) \right] + \frac{3}{4} M_0 \frac{X^2}{\eta^2} \cos 2(\Omega t - \psi_X);$$

$$M_g(t) = M_0 \left[ 1 + \frac{2 + \varepsilon^2 Y^2/(J^2 + L^2/12)}{\varepsilon^2 \eta^2} \right] + \frac{3}{4} M_0 \frac{Y^2/(J^2 + L^2/12)}{\eta^2} \cos 2(\Omega t - \psi_Y),$$

где  $\eta = 2cgG(1 - \varepsilon^2)/\varepsilon\Omega^2$  — коэффициент, имеющий размерность момента вращения и характеризующий нечувствительность вала шпинделя к разбалансировке. В этом случае амплитуды гармоник «качаний» фазы

где  $M_0 = 2M_n$  — общий момент сопротивления вращению для двух подшипников.

По виду полученных формул можно заключить, что при неуравновешенности вала шпинделя возникают гармонические составляющие момента сопротивления вращению. Причем при статическом дисбалансе (см. (5), (6)) преобладает первая, а при динамическом (см. (9)) — вторая гармоника. Оценим влияние неуравновешенности вала на вариации фазы его углового положения при условии, что вращающий момент сохраняет постоянное во

углового положения вала примут вид

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_{c1} &= \frac{\sqrt{\eta^2 + M_0^2}}{I_\xi \Omega^2} \frac{X}{\eta}; \\ \Delta\varphi_{c2} &= \frac{3}{4} \frac{M_0}{I_\xi \Omega^2} \frac{X^2}{\eta^2}; \\ \Delta\varphi_{g2} &= \frac{3}{4} \frac{M_0}{I_\xi \Omega^2} \frac{Y^2/(J^2 + L^2/12)}{\eta^2}.\end{aligned}\quad (11)$$

Приравняв нулю производную  $\partial\Delta\varphi_{c1}(\Omega)/\partial\Omega$ , определим частоту, соответствующую минимуму амплитуды  $\Delta\varphi_{c1}$ :

$$\tilde{\Omega} = \sqrt[3]{\frac{c^2 g G (1 - \varepsilon^2)^{3/2}}{\sqrt{2} \pi \mu R^3 L \varepsilon}}.$$

Полученные соотношения позволяют оценить влияние неуравновешенности вала шпинделя лазерного фотопостроителя на точность синтеза круговых шкал и выбрать скорость вращения вала в области минимальных амплитуд  $\Delta\varphi_{c1}$ ,  $\Delta\varphi_{c2}$ ,  $\Delta\varphi_{g2}$ . Из рис. 2 следует, что в этой области вносимая дисбалансом инструментальная погрешность синтеза круговых шкал для нашей установки составляет пренебрежимо малую величину порядка  $10^{-3}$ — $10^{-2}$  угл. с и менее. Таким образом, шпиндель с аэростатическими подшипниками является исключительно совершенным инструментом для лазерных фотопостроителей. При выводе формул предполагалось, что формы вала и его подшипников идеальные, а неуравновешенность вала шпинделя обусловлена неточностью юстировки механически сопрягаемых с ним элементов (на рис. 2 не показаны). Торцевые упорные подшипники шпинделя также не принимались во внимание, так как при их точном выполнении соответствующая им составляющая момента сопротивления вращению будет иметь постоянное значение. В реальном случае из-за несовершенства геометрической формы вала возникают дополнительные гармоники момента сопротивления вращению. Ориентировочно амплитуды «качаний» фазы углового положения вала от неточности его изготовления можно оценить по формулам (11), если  $X$  заменить на  $X = mg\tilde{r}$ , где  $\tilde{r}$  — амплитуда биения оси вала. Как показывают исследования [4], вследствие усредняющего влияния воздушной пленки радиальные биения осей валов для шпинделей с аэростатическими подшипниками достаточно малы (обычно не превышают 50—100 нм и относятся к некруглости вала как 1:10 или 1:20). В использованном нами шпинделе величина  $\tilde{X}$  более чем на порядок меньше амплитуды  $X$  принятого остаточного дисбаланса.

В заключение отметим, что для шпинделя с вертикальным расположением вала эксцентриситет  $\varepsilon$  становится равным нулю и при идеальных формах вала и подшипников шпинделя «качания» фазы углового положения вала должны отсутствовать. Но и в этом случае нецелесообразна работа на скоростях, превышающих значение  $\tilde{\Omega}$ , определяемое для горизонтального положения вала. При превышении этой скорости подшипники шпинделя начинают «терять» свою жесткость, вследствие чего вал как бы «обегает» поверхность подшипников и будет наблюдаться рост комбинационных гармоник момента сопротивления вращению, амплитуда которых пропорциональна дисбалансу вала и некруглости формы подшипников.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коронкевич В. П. и др. Киноформные оптические элементы: Методы расчета, технология изготовления, практическое применение.— Автометрия, 1985, № 1, с. 4—25.
2. Седухин А. Г. Применение сканирующего способа записи для формирования кодовых масок фотоэлектрических преобразователей угловых перемещений.— ОМП, 1984, № 8, с. 39—42.
- 5 Автометрия № 6, 1985 г.

3. Опоры скольжения с газовой смазкой/Под ред. С. А. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1979.
4. Подшипники с газовой смазкой/Под ред. Н. С. Грессема, Дж. У. Пауэлла.— М.: Мир, 1966.

Поступила в редакцию 16 мая 1985 г.

УДК 681.7.067.54

И. Г. БРОНШТЕЙН, Э. М. ЛИВНИЦ

(Ленинград)

### ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КВАРЦЕВОГО ГРАВИМЕТРА

В данной работе рассматривается оптический преобразователь морского гравиметра и анализируется влияние конструктивных параметров и aberrаций оптической системы на градуировочную характеристику преобразователя.

Функциональная схема преобразователя показана на рис. 1. В основу ее положен метод оптико-электронного преобразования измерения ускорения силы тяжести в числовую величину, который находит все большее применение в гравиметрии [1]. Первичным преобразователем ускорения силы тяжести в морском кварцевом гравиметре является двойная кварцевая упругая система 1. При изменении ускорения силы тяжести маятники 2, 3 упругой системы поворачивают жестко связанные с ними зеркала 4, 5. Для демпфирования действия возмущающих ускорений упругая система с зеркалами помещена в жидкость, которая по своим оптическим свойствам должна быть прозрачной, однородной и иметь определенный показатель преломления.

Преобразование угла поворота зеркал производится следующим образом [2]. Свет от источника 6, установленного непосредственно за щелевой диафрагмой 7, пройдя призму 8, поступает в объектив 9, который образует параллельный пучок лучей. После отражения от зеркал маятников и граней бипризмы 10 пучок света делится на четыре части, проходит тот же объектив в обратном направлении, а затем отражается светоделительной гранью призмы в сторону барабана 11. На поверхности барабана объектив формирует четыре изображения диафрагмы, которые располагаются попарно вдоль двух дорожек — траекторий целей 12 и 13. С одной из дорожек совмещены изображения от зеркала 5 маятника и грани бипризмы, которая показана на рис. 1 справа, а с другой — от зеркала 4 и грани бипризмы, приведенной слева.

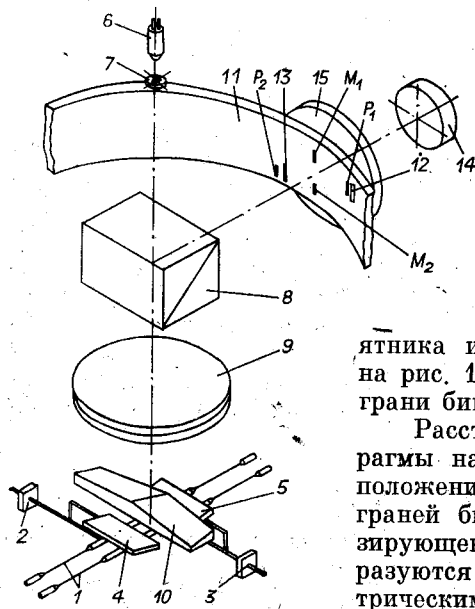


Рис. 1.

Расстояния между изображениями диафрагмы на дорожках являются мерой углового положения подвижных зеркал относительно граней бипризмы. Благодаря действию анализирующего устройства эти расстояния преобразуются во временные интервалы между электрическими импульсами. Для анализа изображения предназначены сканирующий барабан,