ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКОВ УСКОРЕНИЯ

Н.Р.РАХИМОВ, Р.У.АЛИЕВ, А.А.МИРЗААЛИМОВ, Т.В.ЛАРИНА

Соленоид шаклида ўралиб тагликка маҳкамланган оптик тола негизида яратилган тезланиш датчикларининг статик характеристикалари ўрганилди. Бундай тизимнинг юқорига ёки пастга томон тезланишли ҳаракатида пайдо бўладиган инерция кучи оптик тола ўрамига таъсир этади, уни деформациялайди, тола ичидаги ёруғлик оқимининг эгилишга йўқотилишини ўзгартиради. Ташқи тебраниш тизимига эга бўлган бундай қурилманинг сезгирлиги ҳисобланди.

Static characteristics of optoelectronic sensor of acceleration on optical fiber in solenoid form was investigated. At acceleration move of system up or down inertia force activating on optical fiber and deforming it make changes by cross of light. Carry out compute of sensibility of device with inner vibrating system.

Датчики ускорения (акселерометры) находят широкое применение на транспорте, в медицине, в промышленных системах измерения и управления, в инерциальных системах навигации и т. п. В настоящее время в науке и технике применяется много разновидностей акселерометров, имеющих различные принципы действия, диапазоны измерения ускорений, массу, габариты и цены. Несмотря на это поиск новых методов первичных преобразователей датчиков ускорения продолжается.

Оптоэлектронные системы с применением волоконно-оптических датчиков (ВОД), обладая рядом достоинств (невосприимчивость к электромагнитным и радиочастотным помехам, диэлектрические свойства, возможность применения в опасных средах, малая масса и габариты), находят широкое применение в авиационной промышленности для контроля и управления. В последнее время улучшены качественные характеристики световодов, т.е. получены волоконные световоды с потерями меньше 1 дБ/км. Подбором материала и конструкции оптоволокна добиваются увеличения потерь для мод, распространяющихся в оболочке, и их снижения для направленных мод в сердечнике.

В зависимости от материалов, используемых для изготовления оптоволокна, их можно разделить на волокна, в которых сердечник и светоотражающая оболочка выполнены из кварца, легированного окислами бора, фосфора, германия и т.д. Они широко применяются в диапазоне длин волн 0,8 – 1,7 мкм. Достигнутый минимальный уровень затухания при длине волны 1,3 мкм составляет 0,2 - 0,4 дБ/км и при длине волны 1,55 мкм – 0,16 дБ/км.

Принцип действия оптоэлектронного датчика ускорения основан на изменении потерь интенсивности светового потока, распространяющегося по волокну при изменении радиуса изгиба световода или прерывании светового потока.

Авторами [1] разработано множество возможных конструктивных решений по оптоэлектронному датчику ускорения. На рисунке 1 (а, б, в, г) показаны варианты конструкции оптоэлектронных датчиков ускорения на основе оптоволокна.

Один из вариантов датчика (1, г) представляет собой световод, намотанный в виде соленоида и

жестко приклеенный к основанию. При ускоренном движении системы вверх или вниз сила инерции, действующая на виток оптоволокна, деформирует его, вызывая изменение изгибных потерь проходящего света. Поток Ф, проходящий через оптоволокно, в этом случае подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(\alpha L), \quad (1)$$

где Φ_0 – начальный поток в световоде; Ф – проходящий поток; α – коэффициент поглощения, зависящий от вида световода и радиуса соленоида; L – длина изогнутого световода. Коэффициент поглощения α для одномодовых волоконных световодов с гауссовым распределением показателя преломления определяется (4,5) по формуле:

$$\alpha = \rho^{-1} \cdot g\left(\frac{\rho}{R}, V\right) \cdot \exp\left[\frac{2}{3}\left(\frac{\Delta}{n_{c_0}}\right)^2 \cdot \frac{R}{\rho} \cdot \frac{(V-1)^3}{V}\right], \quad (2)$$

где ρ – масштабный параметр; $\Delta = \sqrt{n_{c_0}^2 - n_{c_1}^2}$; n_{c_0} – максимальное значение показателя преломления; n_{c_1} – минимальное значение показателя преломления;

$V = 2\pi\rho\Delta/\lambda$; λ – длина волны излучения; g – некоторая медленно меняющаяся функция; R – параметр внешнего воздействия.

Если определим коэффициент из экспериментальной зависимости (рис.2) при постоянном угле дуги φ_0 Ф = Ф(R) при радиусе изгиба, соответствующему линейному участку зависимости, то можно определить:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = kR + b \quad (3)$$

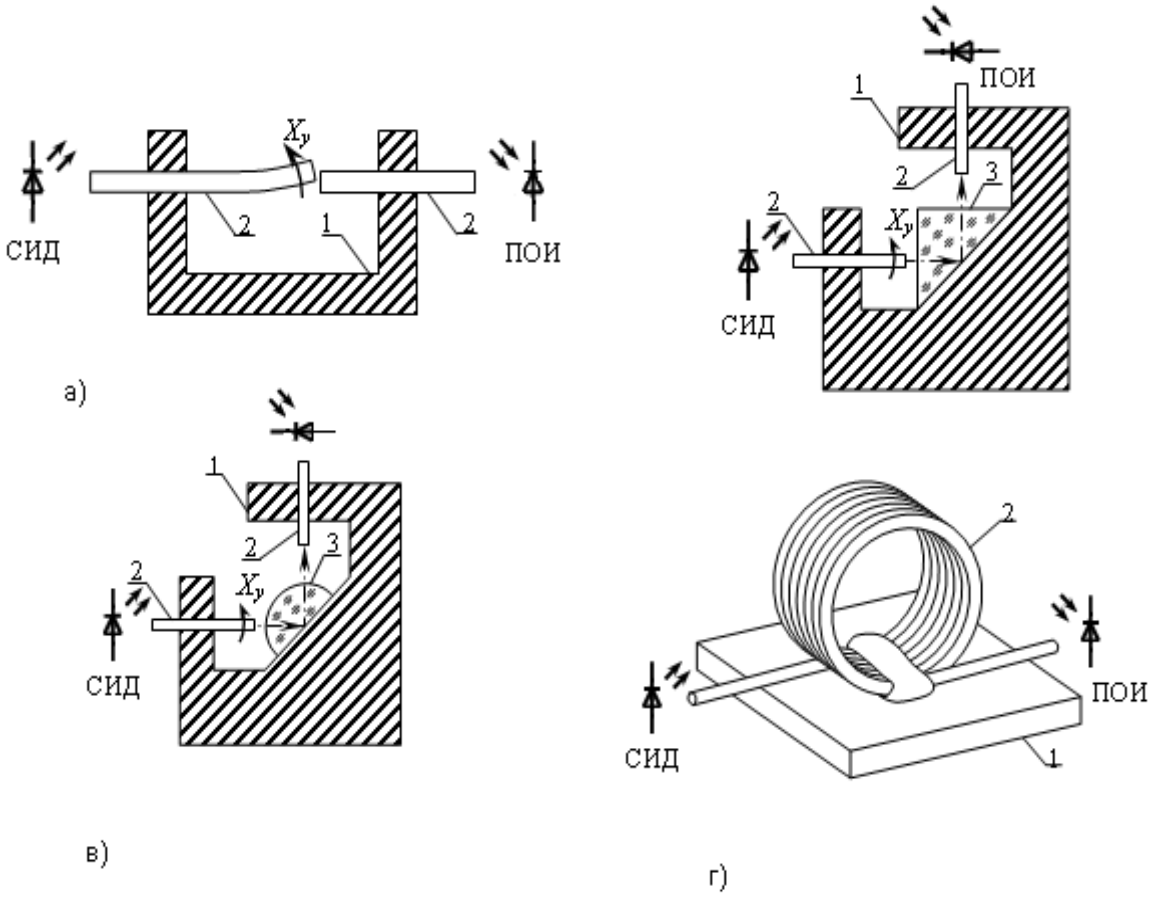


Рис.1. Варианты конструкции оптоэлектронных датчиков ускорения на основе оптоволокна 1 – основание датчика; 2 – световоды; 3 – линза; X_y – ускорение; СИД – светоизлучающий диод; ПОИ – приемник оптического излучения

Преобразуя (1) с учетом (3), получаем

$$\alpha = -\frac{1}{\varphi_0 R}\cdot\ln(kR+b)\,, \quad (4)$$

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \exp\left[\frac{\varphi}{\varphi_0}\cdot\ln(kR+b)\right], \quad (5)$$

где φ – угол дуги изогнутого световода.

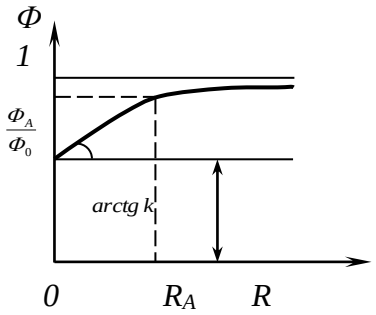


Рис.2. Экспериментальная зависимость затухания сигнала от изгиба соленоида

Рабочую точку датчика R_A можно выбрать в конце линейного участка. Учитывая, что $\varphi = 2\pi N$, то для начального положения датчика получим

$$\Phi_1 = \Phi_0\cdot\exp\left[\frac{2\pi N}{\varphi_0}\cdot\ln\left(kR_A+b\right)\right]. \quad (6)$$

При увеличении ускорения увеличивается деформация витка, который состоит из двух прямолинейных участков и двух полуокружностей.

$$R = R_A - \frac{u}{2}\,, \quad (7)$$

где u – расстояние изгиба.

Учитывая это, Φ_2 можно записать для движения с ускорением:

$$\Phi_2 = \Phi_0\cdot\exp\left[\frac{2\pi N}{\varphi_0}\cdot\ln\left\{k\left(R_A-\frac{u}{2}\right)+b\right\}\right]. \quad (8)$$

а эффективность модуляции находится как

$$\frac{\Phi_1-\Phi_2}{\Phi_1} = 1-\exp\left[\frac{2\pi N}{\varphi_0}\cdot\ln\frac{k\left(R_A-\frac{u}{2}\right)+b}{k\left(R_A+b\right)}\right]. \quad (9)$$

Для конструирования данного оптоэлектронного датчика ускорения можно использовать кварц - полимерные световоды с диаметром оболочки 124 мкм, диаметром сердцевины ≈ 8,5 мкм и диаметром покрытия 220 мкм, при радиусе изгиба 2 – 4мм.[2,3]

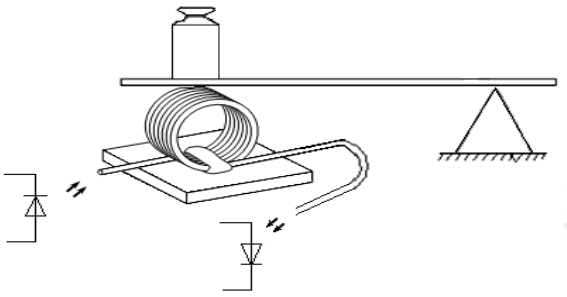


Рис.3 Экспериментальная установка для снятии статистическая характеристика оптоволокно. 1-задающий генератор, 2-СИД, 3-оптоволокно, 4-ПОИ, 5-измерительная установка, 6-гирька, 7-планка, 8-опора

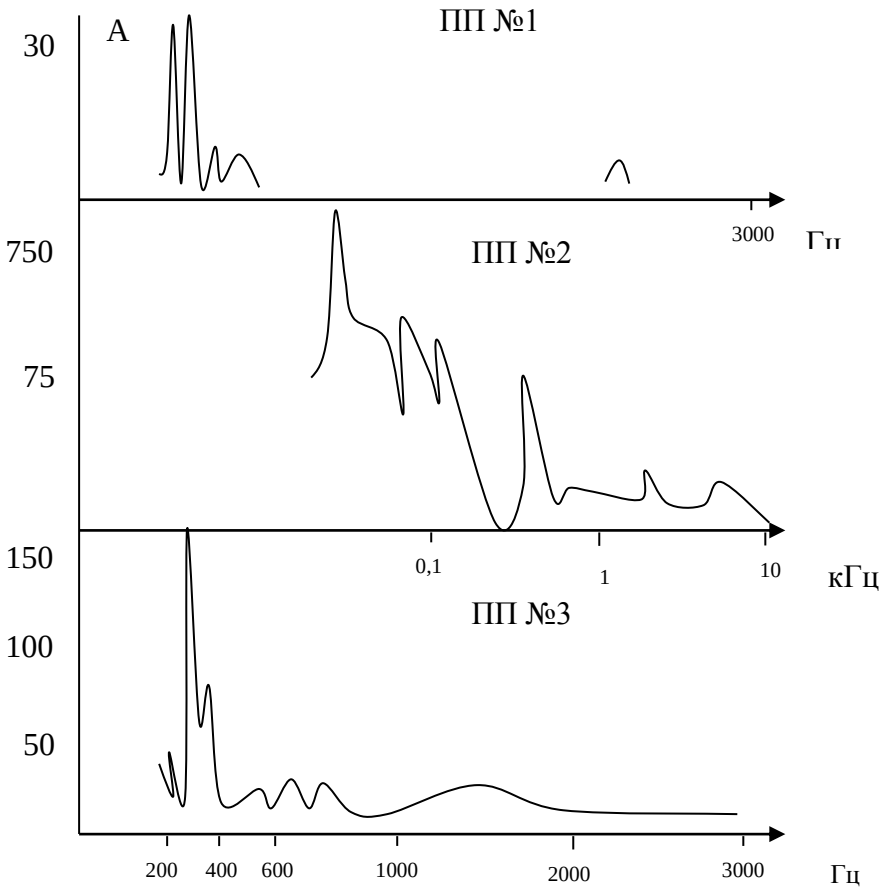


Рис.4 Амплитудно-частотные характеристики

Основным недостатком описанного преобразователя является неравномерность частотной характеристики.

Характеристика идеального преобразователя – это резонансная кривая для системы с одной степенью свободы (рис.5). Для такой системы чувствительность при частотах в несколько раз меньших резонансной частоты мало отличается от статической чувствительности. Поэтому можно считать, что в полосе от нуля до ω_1 чувствительность с достаточной точностью постоянная.

Реальный преобразователь имеет большое количество дополнительных резонансных пиков, которые могут быть сравнимы с основными. Чувствительность же между пиками очень мала.

Неравномерность частотной характеристики может быть вызвана, по нашему мнению, следующими причинами:

- неравномерностью распределения массы по длине световода из-за непостоянства диаметра и плотности материала (в особенности пластикового покрытия);
- неравномерностью упругих свойств световода (в особенности платинового покрытия);
- не идеальностью формы витка.

Все эти неравномерности приводят к увеличению числа степеней свободы. Плохую воспроизводимость частотной характеристики можно объяснить в этом случае плохой воспроизводимостью приложения нагрузки.

Уменьшить влияние неравномерности механических свойств световода можно прикрепив к свободному витку внешнюю колебательную систему, жесткость которой и массивность больше жесткости и массивности витка. Для проверки этого положения был поставлен следующий эксперимент. К верхней точке чувствительного световодного витка прикреплялись грузики разной массы, и в каждом случае снималась амплитудной – частотные характеристики (АЧХ). В качестве вибростенда был использован громкоговоритель. Управление частотой и амплитудой смещения мембраны осуществлялось изменением частоты и амплитуды подаваемого на громкоговоритель напряжения. Результаты приведены на рис.6. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют массам грузиков m_1, m_2, m_3 таких, что $m_1 < m_2 < m_3$ и напряжениям на громкоговорителе 60В, 10В и 5В . Первый пик на характеристиках соответствует резонансу

громкоговорителя. Двойной основной пик кривой 3 объясняется наличием дополнительной вращательной степени свободы грузика m_3. Видно, что кривая 3 преобразователя с наибольшей внешней массой наиболее плавная [4].

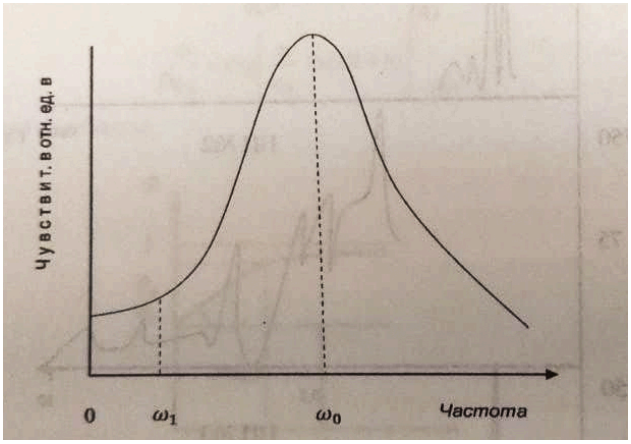


Рис.5 Характеристика идеального преобразователя.

Произведем расчет чувствительности преобразователя с внешней колебательной системой. Схема нагружения витка световода изображена на рис.7 (массой витка пренебрегаем). Методами сопротивления материалов вычисляем: изгибающий момент, возникающий в световоде

$M = PR(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2}cos\varphi)$; изменение кривизны световода $\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E\Phi}$, где $E\Phi$ – жесткость световода на изгиб;

смещение верхней точки ветка $\delta = 0{,}148\frac{PR^3}{E\Phi}$.

Отсюда находим:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\delta}{0{,}148R^2}(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2}cos\varphi) \quad (10)$$

Предположим, что колебательная система состоит из упругого элемента жесткостью *K* и груза, массой *m*. Тогда при движении преобразователя с ускорением *a*

$$\delta = \frac{ma}{k} \quad (11)$$

Используем формулу

$$\Phi_1 = \Phi_0\, exp[(\frac{2\pi}{\varphi_0} ln(kR + b)]$$

Пусть на некотором малом участке длины световода $dl=Rd\varphi$ кривизна увеличилась на величину $\frac{1}{\rho}$. Новый радиус изгиба станет равным $\frac{\rho R}{\rho + R}$, а угол - $\frac{\rho + R}{\rho} d\varphi$. Теперь

$$\Phi_2 = \Phi_0\ \exp[(\frac{\rho+R}{\rho\varphi_0} ln\left(\frac{\rho R}{\rho+R} + \mathrm{b}\right) d\varphi]$$

интенсивность на выходе будет

$$\Phi_2 = \Phi_0\ \exp[(\frac{\rho+R}{\rho\varphi_0} ln\left(\frac{\rho R}{\rho+R} + \mathrm{b}\right) d\varphi]$$

Световой поток на выходе полного витка (с учетом (10) и (11)) будет:

$$\Phi = \Phi_0\ \exp \int_0^{2\pi} [(1 + \frac{ma}{0.148kR}\left(\frac{1}{\pi} - \frac{\cos\varphi}{2}\right)] \ln\left[\frac{kR}{1+\frac{ma}{0.148kR}\left(\frac{1}{\pi} - \frac{\cos\varphi}{2}\right)} + b\right] d\varphi \qquad (12)$$

График этой функции представлен на рис.8. Из графика видно, что чем сильнее деформирован виток, тем большее изменение светового потока вызывает его деформация. Следовательно, для повышения чувствительности следует создавать сильную начальную деформацию.

Определим оптимальное число витков первичного преобразователя такое, при котором изменение

интенсивности на выходе максимально. Пусть поток на выходе недеформированного преобразователя

$$\Phi_1 = \Phi_0\ e^{-\alpha N}$$

где Φ_0 - начальный поток на входе, *N* - число витков, α зависит от кривизны. При деформации α увеличивается на величину Δα, а поток на выходе становится равной

$$\Phi_1 = \Phi_0 e^{-(\alpha+\Delta\alpha)N}$$

находим максимум функции $\Phi_1 - \Phi_2$ обычным способом.

$$d(\Phi_1 - \Phi_2) / dN = 0$$

Откуда

$$N = ln(\frac{\alpha}{\alpha+\Delta\alpha})^{-1/\Delta\alpha} \quad (13)$$

При $\Delta\alpha << \alpha$ *N* мало зависит от $\Delta\alpha$. Зависимость N(α) приведена на рис.9

Поскольку при деформации витка чувствительность его увеличивается (см.выше), выберем такую деформацию, чтобы ширина витка была вдвое больше его высоты. В этом случае форма витка близка к кривой, состоящей из двух полуокружностей и двух прямолинейных участков. (Рис.10)



Рис.6 Амплитудно – частотные характеристики и амплитуды подаваемого на громкоговоритель напряжения.

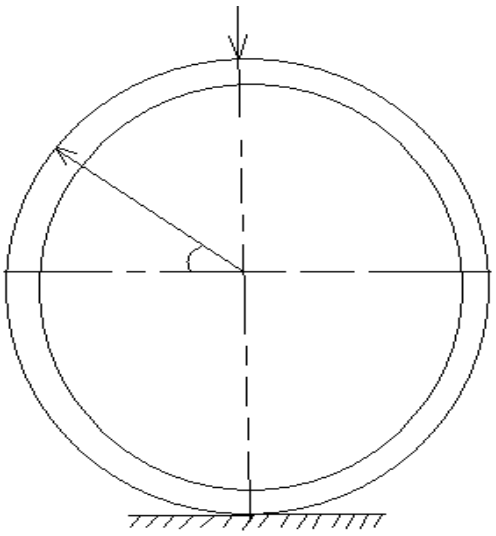


Рис.7 Схема нагружения витка световода

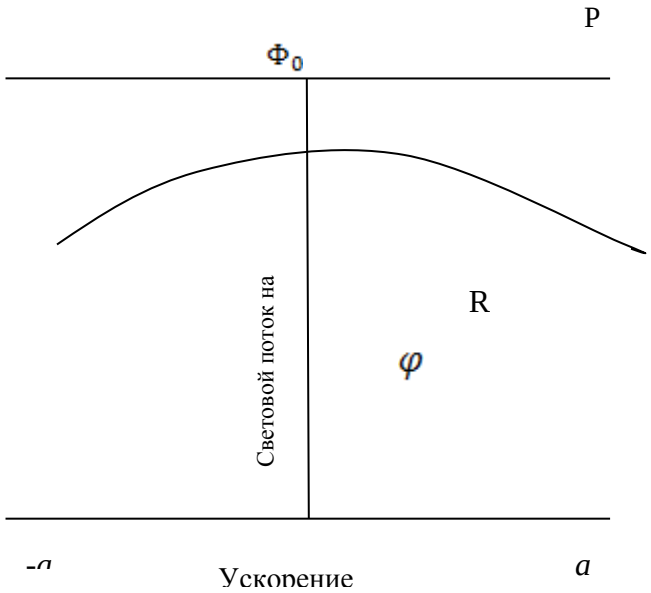
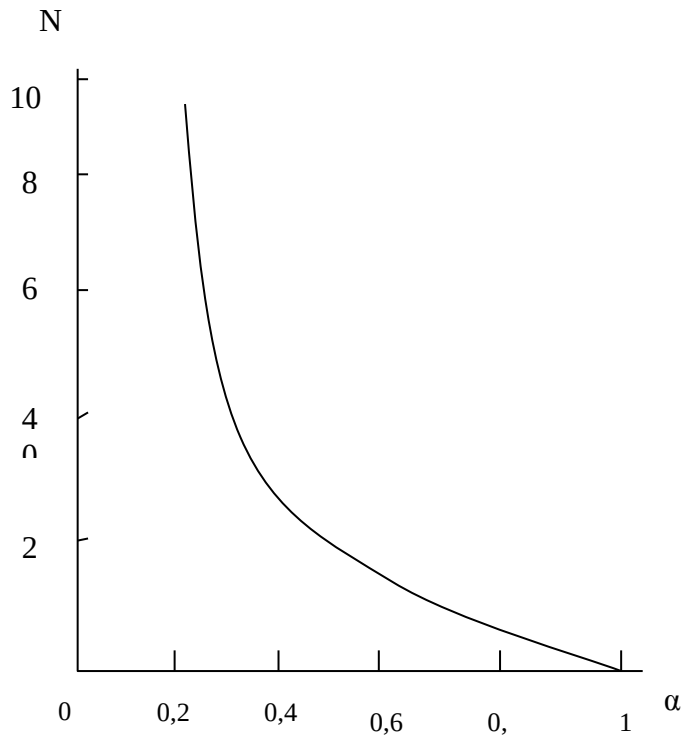


Рис.8 Зависимость ускорение от светового потока



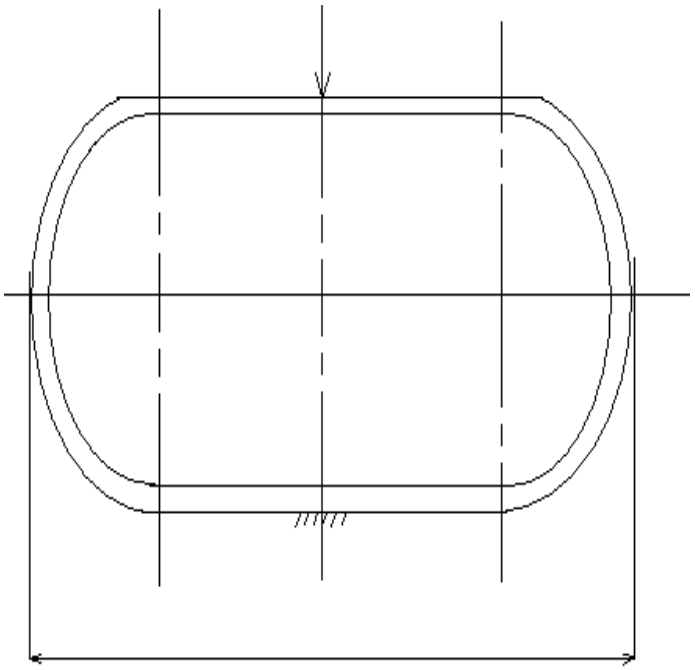


Рис.9 Зависимость N(α) ***Рис.10***

Изменение кривизны криволинейного участка при приложении нагрузки P равно

$$\frac{1}{\rho} = \frac{PR}{E\Phi}(0.0973 - \frac{cos\varphi}{2}) \text{ , (14)}$$

а перемещение точки приложения нагрузки

$$\delta = 1{,}05\frac{PR^3}{EJ}$$

И, аналогично (12),

$$\Phi = \Phi_0 \exp \int_0^{2\pi} [\frac{1}{\varphi_0}(1 + \frac{ma}{1.05kR}\left(0.0973 - \frac{\cos\varphi}{2}\right)] \ln\left[\frac{kR}{1+\frac{ma}{1.05kR}\left(0.0973-\frac{\cos\varphi}{2}\right)} + b\right] d\varphi \qquad (15)$$

Заметим, что среднее значение кривизны (14) отлично от нуля, тогда как среднее значение кривизны (10) равно нулю. Этим и объясняется большая чувствительность сплющенного витка.

Литература:

1. Рахимов Н.Р., Ушаков А.О. Исследование оптоэлектронного метода и разработка первичных преобразователей амплитудных датчиков ускорения. // ГЕО – Сибирь-2011. Т.5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч.1: сб. матер. VII Междунар. научн. конгресса «ГЕО – Сибирь-2011», 19-29 апреля 2011 г., Новосибирск.- Новосибирск: СГГА, 2011. – С. 20 -24.

2. Снайдер А.У. Теория одномодовых волоконных световодов // Письма в ЖТФ, 1981. № 1, Т. 69. С. 7-15.

3. Разработка волоконно-оптических преобразователей для систем автоматизации прочностного эксперимента. // Отчет НИР. Ташкент, Отдел теплофизики АН РУз, 1988. С. 20-21.

4. Рахимов Н.Р., Серьезнов А.Н., Шамирзаев С.Х. Способ определения развития трещин в строительных конструкциях. Патент на изобретение №2007122553\28(024554) от 29.01.09.

Сибирская государственная геодезическая академия,
Андижанский государственный университет
Принято 6 января 2012 года