

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
(МФТИ, Физтех)

Вопрос по выбору

Волоконно-оптический датчик вибрации на изгибных
потерях

Работу выполнили:

А. А. Деменкова

Д. А. Зайцев

Д. Лисновецкий

Д. А. Сутурин

Научный руководитель:

А. Ю. Игуменов

Долгопрудный, 2024 г.

1 Аннотация

В данной работе реализован волоконно-оптический датчик вибрации на основе изгибных потерь мощности. Датчик представляет собой петлю стандартного одномодового оптоволокна с грузиком на вершине. Показано, что при установке такой конструкции на вибростоллик возможна регистрация колебаний столика в плоскости петли оптоволокна. Исследована работа датчика при разных диаметрах петли: установлено, что при диаметрах петли 1.7 и 2.05 см возможна калибровка датчика и определение абсолютной амплитуды колебаний столика.

2 Теоретические сведения

По закону полного внутреннего отражения свет отражается от среды с меньшим показателем преломления при падении под определенным углом из среды с большим показателем преломления.

Закон полного отражения формализован в уравнении Снелла-Декарта, которое связывает углы падения θ_1 и преломления θ_2 света при переходе из одной среды в другую:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2),$$

где n_1 и n_2 - показатели преломления сред.

Оптоволокно состоит из сердцевины с большим показателем преломления, и оболочки с меньшим. Благодаря закону полного внутреннего отражения, свет, попадая в оптоволокно под углом, превышающим угол полного отражения θ_c , находится внутри сердцевины волокна. Угол полного отражения для двух сред с разными показателями преломления n_1 и n_2 где ($n_1 > n_2$) определяется по следующей формуле:

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

При изгибе оптоволоконного кабеля происходят потери энергии. Потери при изгибе прямо пропорциональны величине $\exp\left(-\frac{R}{R_c}\right)$, где R_c - критический радиус витка, при котором начинаются потери. Также изгибные потери растут с увеличением длины волны излучения, поэтому в экспериментах используем генератор постоянной мощности на длине волны 1550 нм (распространенный телекоммуникационный стандарт).

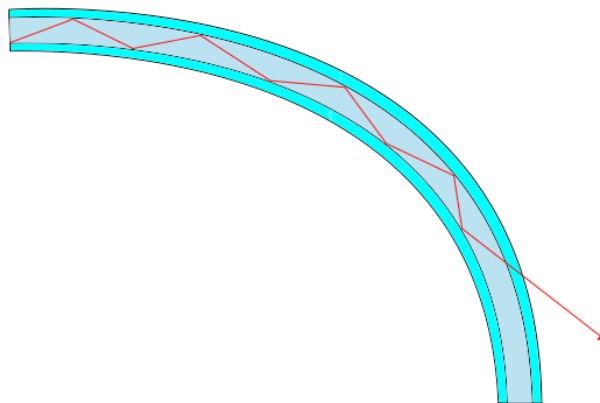


Рис. 1: Потери энергии при изгибе оптоволокна

3 Экспериментальная установка

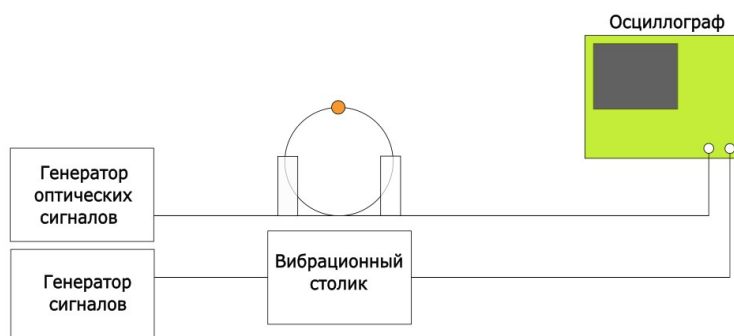


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. В работе используется оптоволокно, изогнутое в петлю, на верху которой закреплён грузик массой 76 мг. Сама петля закреплена на подставке. Генератор подаёт сигналы на вибрационный столик, который и раскачивает эту подставку, за счёт чего возникают вынужденные колебания грузика (рис. 3).

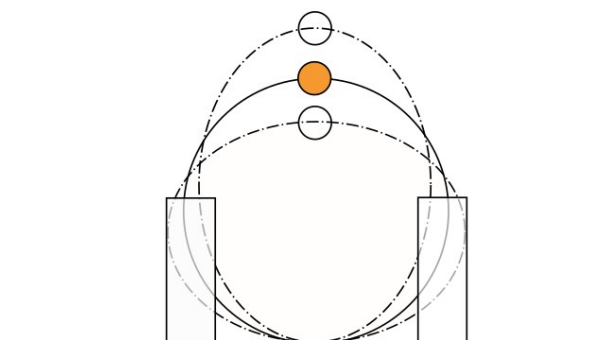


Рис. 3: Вынужденные колебания грузика

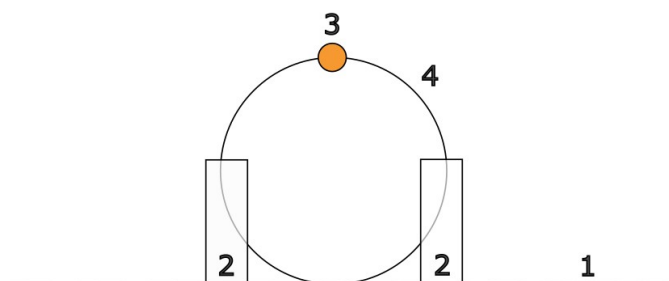


Рис. 4: Конструкция датчика

Рассмотрим отдельно конструкцию датчика (рис. 4): 1 - оптическое волокно, подводящее/отводящее излучение; 2 - бортики для того, чтобы колебания происходили в одной плоскости; 3 - грузик в виде бусинки; 4 - изогнутое волокно в виде окружности.

Когда соответствующим генератором подаётся оптический сигнал по оптоволокну, деформирующемуся под действием колебаний, сигнал претерпевает изгибные потери. Затем искаженный сигнал снимается осциллографом.

4 Результаты и обсуждение

Лучший диаметр петли можно выбрать двумя способами: по амплитуде оптического сигнала можно однозначно определить амплитуду механических колебаний, корректное определение частоты механических колебаний по Фурье-спектру.

В ходе эксперимента были получены графики зависимости амплитуды оптического сигнала от времени для нескольких диаметров петли световода (1 см, 1.3 см, 1.7 см, 2.05 см) при разных амплитудах генератора (1, 2, 3, 4, 5) на частоте 1 Гц.

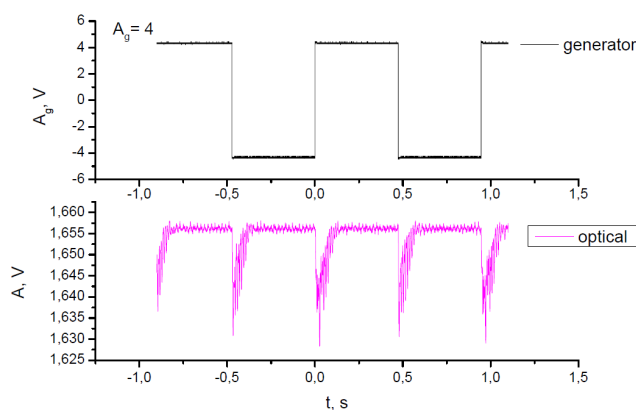


Рис. 5: Исходный и оптический сигнал

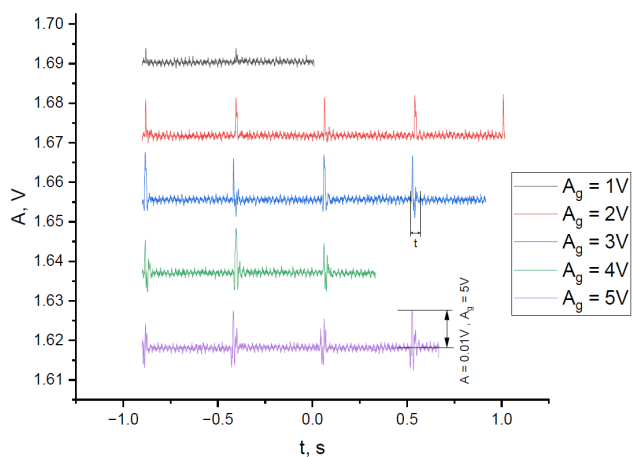


Рис. 6: График зависимости амплитуды оптического сигнала от времени, диаметр петли $D = 1$ см

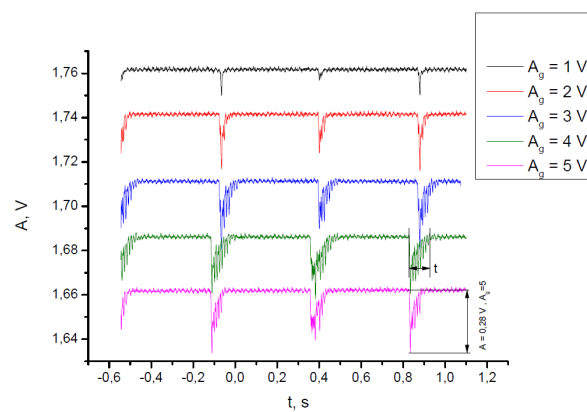


Рис. 7: График зависимости амплитуды оптического сигнала от времени, диаметр петли $D = 1.3$ см

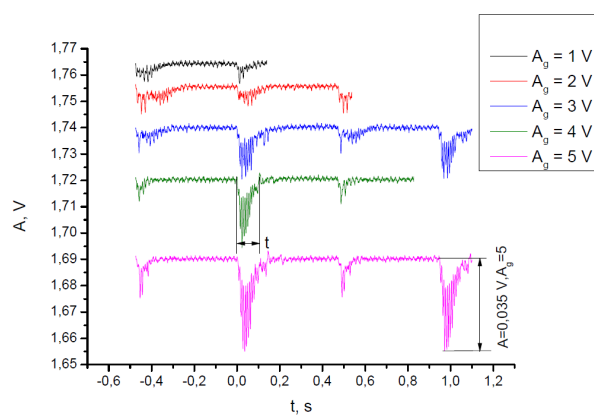


Рис. 8: График зависимости амплитуды оптического сигнала от времени, диаметр петли , $D = 1.7$ см

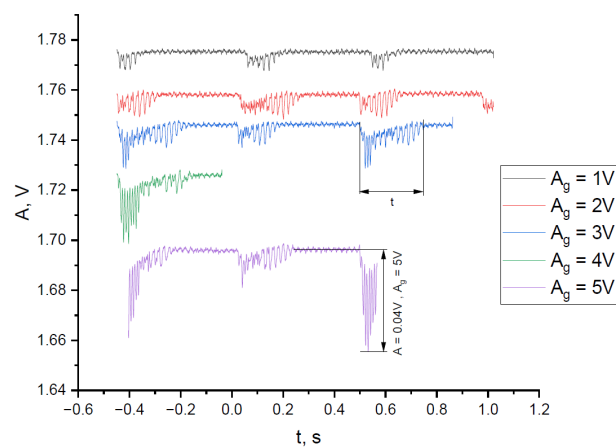


Рис. 9: График зависимости амплитуды оптического сигнала от времени, диаметр петли , $D = 2.05$ см

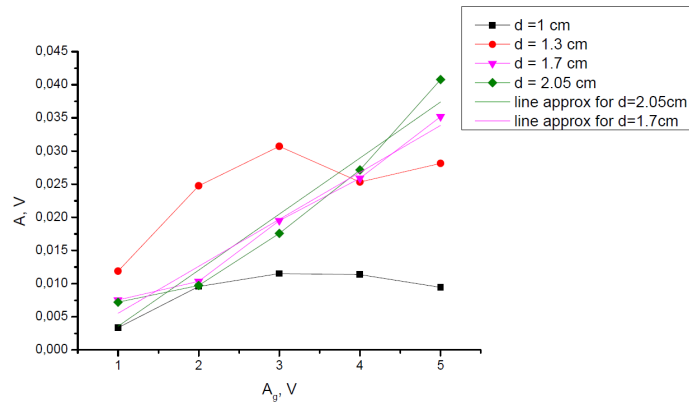


Рис. 10: График зависимости максимальной амплитуды оптического сигнала от амплитуды генератора

Из графика на рис. 10 видно, что для слишком маленьких диаметров петли (1 см и 1.3 см) максимальная амплитуда оптического сигнала выходит в режим насыщения, то есть для разных амплитуд генератора амплитуда оптического сигнала почти постоянная. Таким образом по амплитуде оптического сигнала сложно сделать вывод об амплитуде исследуемых колебаний. Для достаточно больших диаметров петли (1.7 см и 2.05 см) зависимость линейная, причем графики почти совпадают, значит эти два датчика одинаково реагируют на колебания с определенной амплитудой генератора, что дает возможность судить об амплитуде исследуемого сигнала. Аппроксимируем эти два графика линейной функцией. Для диаметра 2.05 см коэффициент наклона равен 0.00846, а свободный коэффициент — -0.00487 В ($\chi^2 = 1.4 \cdot 10^{-5}$), а для диаметра 1.7 см — 0.00708 и -0.00155 В ($\chi^2 = 3.9 \cdot 10^{-6}$). По критерию хи-квадрат эти графики могут быть аппроксимированы прямой. Эти прямые являются калибровочными для датчика.

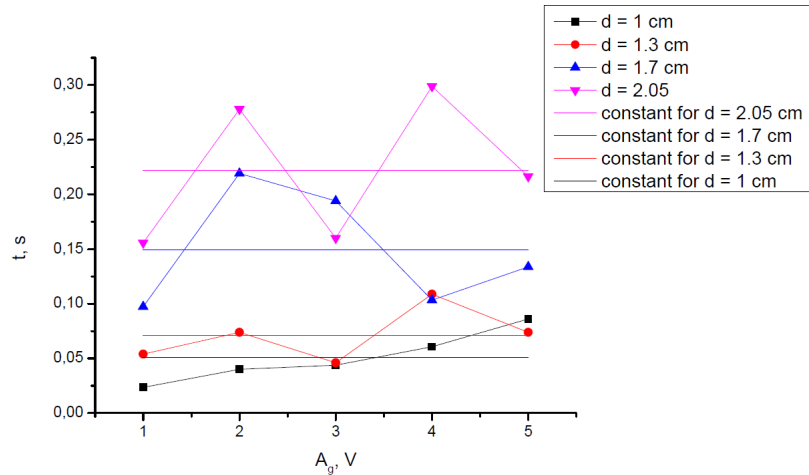


Рис. 11: График зависимости характерного времени затухания колебаний оптического сигнала от амплитуды генератора

Построим график зависимости характерного времени затухания механических колебаний от амплитуды генератора для разных диаметров петли, также на графике изобразим среднее значение времени затухания (рис. 11). Характерное время затухания ограничивает диапазон измеряемых частот: время затухания должно быть меньше половины периода механических колебаний, так как на осциллограмме колебания будут накладываться друг на друга. Для диаметров петли 2.05 см и 1.7 см

время затухания составляет 0.22 с и 0.15 с, значит максимально возможная измеряемая частота равна 4.54 Гц и 6.67 Гц соответственно.

В ходе эксперимента были получены Фурье-спектры оптического сигнала для нескольких диаметров петли световода (1 см, 1.3 см, 1.7 см, 2.05 см) при разных амплитудах генератора (1, 2, 3, 4, 5) на частоте 1 Гц.

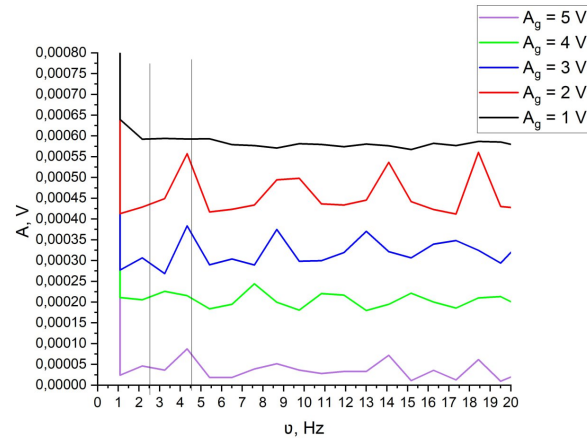


Рис. 12: Фурье-спектр оптического сигнала, диаметр петли $D = 1$ см

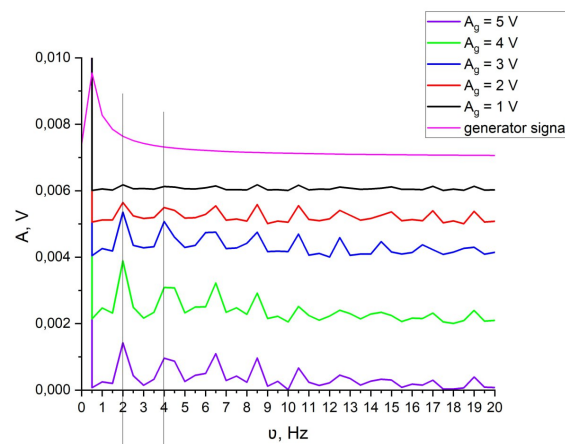


Рис. 13: Фурье-спектр оптического сигнала, диаметр петли $D = 1.3$ см

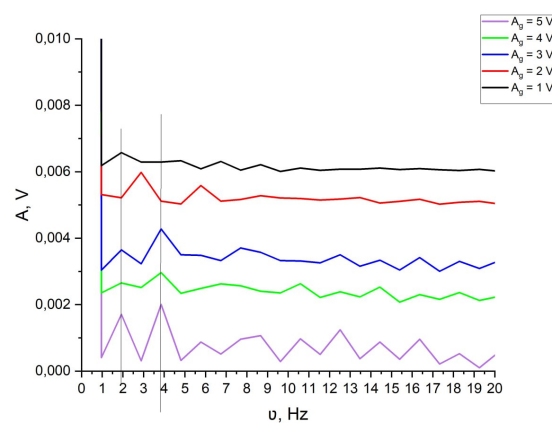


Рис. 14: Фурье-спектр оптического сигнала, диаметр петли $D = 1.7$ см

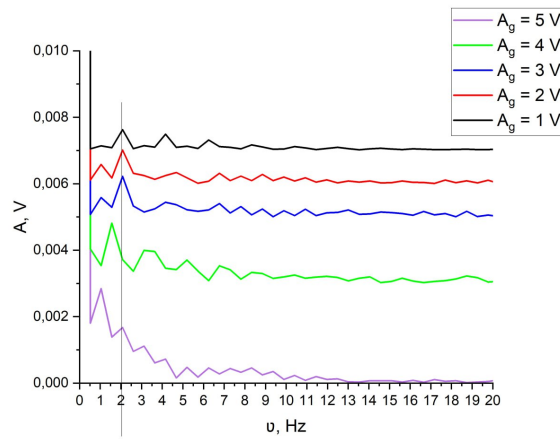


Рис. 15: Фурье-спектр оптического сигнала, диаметр петли $D = 2.05$ см

Построив Фурье-спектры оптического сигнала при разных амплитудах генератора для нескольких диаметров, определим какой из датчиков корректно реагирует на подаваемую генератором частоту. В данном эксперименте частота прямоугольного сигнала равнялась 1 Гц. Так как груз совершал колебания в два раза чаще (груз колеблется при движении вверх и вниз), значит основная частота колебаний — 2 Гц. Для диаметра петли 1.3 см при всех исследуемых амплитудах генератора пик соответствующий частоте 2 Гц не смещен, а в остальных случаях основная частота не соответствует 2 Гц для всех исследуемых амплитуд при определенном диаметре петли.

5 Заключение

В данной работе было проведено исследование оптимального радиуса кривизны петли оптоволокна для изучения механических колебаний. При построении Фурье-спектров оптического сигнала было выявлено, что датчик с петлей диаметром 1.3 см корректно определяет частоту колебаний, так как пик соответствующий частоте 2 Гц не смещен. По графику зависимости максимальной амплитуды оптического сигнала от амплитуды генератора видно, что с помощью датчиков с большим диаметром петли (1.7 см и 2.05 см) можно определить амплитуду механических колебаний. Для диаметров петли 2.05 см и 1.7 см определена максимально возможная детектируемая частота, которая составила 4.54 Гц и 6.67 Гц.