

РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ЗАЗОРА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Деловеров Т.З., Ясовеев В.Х.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, коэффициент передачи, оптический тракт, измерение радиального зазора, лопатка газотурбинного двигателя, оптическое излучение.

Аннотация. В статье рассматривается волоконно-оптический датчик, предназначенный для измерения радиального зазора лопаток газотурбинного двигателя. Приведён анализ оптического канала и выполнен расчёт коэффициента передачи излучения от источника к лопатке. Получены аналитические выражения для коэффициента передачи волоконно-оптического датчика. Показано влияние геометрических параметров системы и апертуры волокон на эффективность передачи оптического сигнала.

CALCULATION OF THE TRANSMISSION FACTOR OF THE FIBER-OPTIC GAP SENSOR OF THE GAS TURBINE ENGINE

Deloverov T.Z., Yasoveev V.Kh.

Ufa University of Science and Technology, Ufa

Keywords: fiber-optic sensor, transmission coefficient, optical path, blade tip clearance, gas turbine engine blades.

Abstract. The article discusses a fiber-optic sensor designed to measure the radial clearance of gas turbine engine blades. It provides an analysis of the optical channel and calculates the transmission coefficient of radiation from the source to the blade. Analytical expressions are obtained for the transmission coefficient of the fiber-optic sensor. The influence of the system's geometric parameters and fiber aperture on the optical signal transmission efficiency is demonstrated.

Контроль радиального зазора лопаток ротора и корпусом газотурбинного двигателя (ГТД) является важной задачей при проведении испытаний и эксплуатации турбомашин. Для решения данной задачи применяются различные методы измерения, среди которых перспективными являются волоконно-оптические методы [1]. Эффективность работы таких датчиков во многом определяется характеристиками оптического канала и одним из основных параметров является коэффициент передачи, который определяется по формуле:

$$K_{\text{ПЕР}} = \frac{P_1}{P_{\text{ИСТ}}} T_{\text{ЗАП}} T_B,$$

где P_1 – поток от источника излучения на торец волокна, $P_{\text{ИСТ}}$ – полный поток источника излучения, $T_{\text{ЗАП}}$ – коэффициент заполнения площади торца жилами волокна, T_B – коэффициент пропускания одной жилы волокна, при прямом падении лучей на торец.

В рассчитанной формуле не учитывается расположение отдельных жил волокна, определяющее их смещение относительно фотометрической оси источника излучения, так как в пределах номинальной числовой апертуры волокон их пропускание сравнительно мало и зависит от угла наклона падающих на них лучей [2]. Ограничение угла падения лучей на торец волокна в пределах их

номинальной апертуры обеспечивается заданным расстоянием между торцом волокна и источником излучения.

В свою очередь, отношение $P_1/P_{ИСТ}$ зависит либо от диаметра торца волокна, либо от его расположения относительно источника излучения, а также от диаграммы направленности источника излучения. При использовании в качестве источника излучения светодиода его можно представить точечным источником [3]. Тогда полный поток источника излучения:

$$P_{ИСТ} = 2\pi I_0 \int_0^{\pi/2} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi,$$

где I_0 – сила света в направлении фотометрической оси, $f(\varphi)$ – функция источника излучения, φ – угол излучения.

Поток, попадающий на торец волокна, центр которого лежит на фотометрической оси источника:

$$P_1 = 2\pi I_0 \int_0^{\varphi_0} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi,$$

где φ_0 – максимальный угол излучения, при котором луч не выходит за границы торца.

При подстановке уравнений $P_{ИСТ}$ и P_1 получается:

$$P_1 = P_{ИСТ} \frac{\int_0^{\varphi_0} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi}{\int_0^{\pi/2} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi}.$$

Максимальный угол падения излучения на торец, при котором луч не выходит за границы:

$$\varphi_0 = \arctg \frac{R_1}{x_1},$$

где R_1 – радиус торца волокна, x_1 – расстояние между источником излучения и торцом волокна.

Если угол φ_0 превысит номинальный апертурный угол волокна φ_m [4], тогда часть жил не будет участвовать в передаче излучения, что приведёт к снижению чувствительности. С другой стороны, мощность излучения уменьшается при малых углах φ_0 , то есть, при удалении торца от источника излучения [5]. Следовательно, светодиод должен быть расположен на расстоянии

$$x_1 = \frac{R_1}{\tg \varphi_m}$$

от торца волокна, при котором $\varphi_0 = \varphi_m$.

Учитывая $\varphi_0 = \varphi_m$, коэффициент передачи представляется в виде:

$$K_{ПЕР} = \frac{\int_0^{\varphi_m} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi}{\int_0^{\pi/2} f(\varphi) \sin \varphi d\varphi} T_{ЗАП} T_B.$$

Диаграмму направленности большинства светодиодов можно аппроксимировать функцией $\cos^\xi \varphi_m$, где $\xi > 1$ – показатель степени аппроксимации диаграммы направленности [6]. В этом случае, выражение коэффициента передачи датчика принимает вид:

$$K_{ПЕР} = (1 - \cos^{\xi+1} \varphi_m) T_{ЗАП} T_B.$$

На рисунке 1 приведён график зависимости по рассчитанным значениям $K_{ПЕР}$ от апертурного угла φ_m при $\xi = 2$, $T_{ЗАП} = 0,6$ и $T_B = 0,9$.

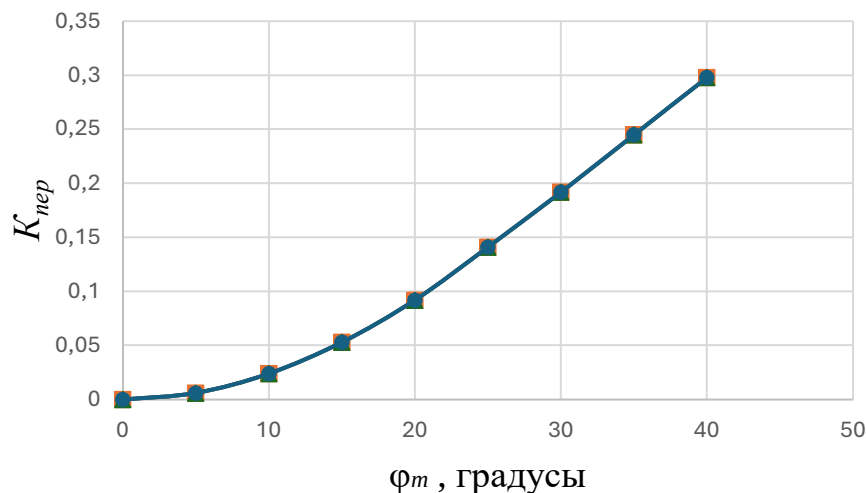


Рис. 1. График зависимости $K_{ПЕР}$ от апертурного угла φ_m

Полученные выражения позволяют определить коэффициент передачи волоконно-оптического датчика.

Список литературы

1. Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Проблемы измерения радиальных зазоров в экстремальных условиях проточной части газотурбинного двигателя и их решение на основе применения одновитковых вихретоковых датчиков // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 6928-6937.
2. Зак Е.А. Волоконно-оптические датчики. – М.: Радио и связь, 1990. – 192 с.
3. Гауэр Дж. Оптические системы связи. – М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
4. Бадеева Е.А. Теоретические основы проектирования амплитудных волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом. – М.: МГУЛ, 2004. – С. 68-70, 181-186.
5. Минеев А.В., Ясовеев В.Х. Аналитическая модель измерительного оптико-электронного зонда малых аксиальных перемещений // Автометрия. – 2021. – Т. 57, №1. – С. 80-91.
6. Минеев А.В., Ясовеев В.Х. Анализ влияния значимых факторов на результаты измерений линейных перемещений волоконно-оптическим преобразователем // Инженерная физика. – 2021. – №7. – С. 3-13.

Сведения об авторах:

Деловеров Тимур Зинфирович – магистрант;

Ясовеев Васих Хаматович – д.т.н., профессор.