

ВОЛОКОННЫЕ ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ КОМПАНИИ “ФИЗОПТИКА” ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ (методика расчета и оценка)

В документе проведена оценка основных показателей надежности волоконных датчиков вращения, выпускаемых компанией “Физоптика”.

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДЕЖНОСТИ

Надежность является комплексным свойством, которое включает в себя такие свойства как: работоспособность, сохраняемость, долговечность.

Основные характеристики надежности для невосстанавливаемых изделий, не ремонтируемых после отказа (интегральные схемы, разъёмы и т.д.) перечислены ниже:

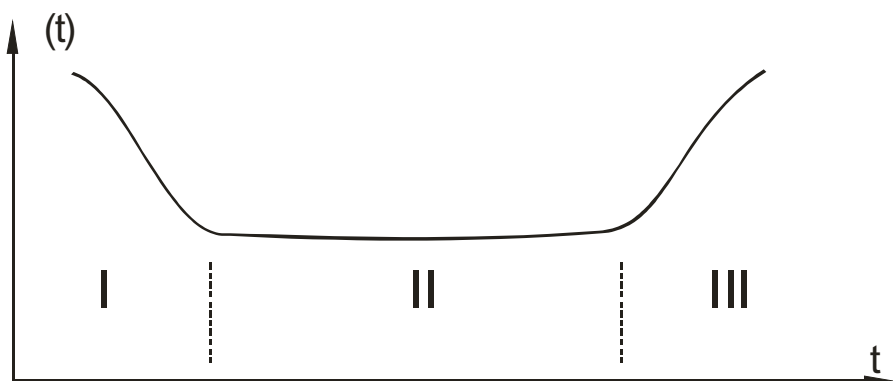
- вероятность безотказной работы за время t : $P(t)$;
- вероятность отказа за время t : $Q(t) = 1 - P(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$ – указывает среднее число отказов, возникающее за единицу времени эксплуатации изделия;
- среднее время наработки изделия до отказа T .

В расчетах времени до отказа t считается случайной величиной и используется аппарат теории вероятностей.

Свойства (аксиомы):

- $P(0)=1$ (рассматривается эксплуатация работоспособных изделий);
- $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t)=0$ (работоспособность не может быть сохранена неограниченное время);
- $dP(t)/dt \leq 0$ (после отказа изделие не восстанавливается).

Типичная кривая изменения $\lambda(t)$ в течение срока эксплуатации (жизни) изделия имеет вид:



I – этап приработки $d \lambda(t)/dt < 0$

II – этап нормальной эксплуатации $\lambda(t) = \text{const}$

III – этап старения $d \lambda(t)/dt > 0$

Взаимосвязь между характеристиками надежности:

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t (t)dt\right) \text{ для этапа II } P(t) = \exp(-t)$$

$$T = \int_0^{\infty} P(t)dt \text{ для этапа II } P(t) = \exp(-t/T), \text{ где } T=1/\lambda$$

Для невосстанавливаемого изделия, надежность характеризуется средним временем наработки до отказа T .

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

Условия (предпосылки) расчета:

- расчет производится для этапа нормальной эксплуатации изделия, поэтому считают $(t)\text{-const}$;
- создают надежность схему изделия, причем считают, что отказ элемента (группы элементов), включенных в надежность схему, приводит к отказу всего изделия;
- каждый элемент, включаемый в надежность схему, характеризуется интенсивностью отказов λ_i и вероятностью безотказной работы $P_i(t)$; считают, что отказы отдельных элементов независимы между собой (хотя бы в первом приближении), поэтому вероятность безотказной работы изделия $P_{изд}(t)$:

$$P_{изд}(t) = P_1(t) * P_2(t) * \dots * P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t)$$

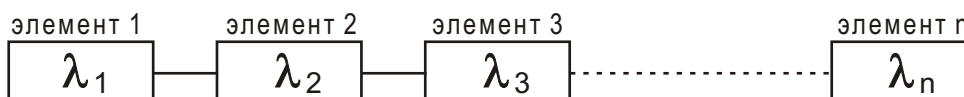
а интенсивность отказов изделия $\lambda_{изд}$

$$\lambda_{изд} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

(складываются показатели степени в выражении $P = \exp(-\lambda t)$),

и тогда для среднего времени наработки на отказ имеем $T_{изд} = 1/\lambda_{изд}$.

Перед проведением расчета выбирается состав элементов (групп элементов), отказы которых наибольшим образом влияют на надежность блока и отказ которых приводит к отказу блока, составляется надежность схема следующего вида



и вычисляется суммарная интенсивность отказов изделия.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

3.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

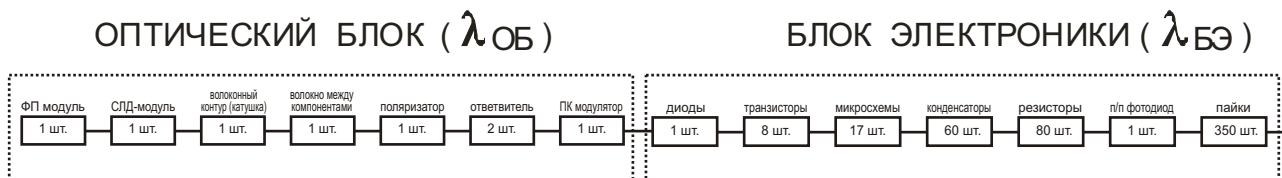
В состав волоконных датчиков угловой скорости, выпускаемых компанией “Физоптика”, входят два функциональных блока, размещенных в одном корпусе: оптический блок и электронный блок.

Для оценки использовались сведения о надежности комплектующих электронных компонентов из единых справочников по “Надежности изделий электронной техники и квантовой электроники” изд. ВНИИ “Электростандарт”, а также из стандарта MIL-HDBK-217F.

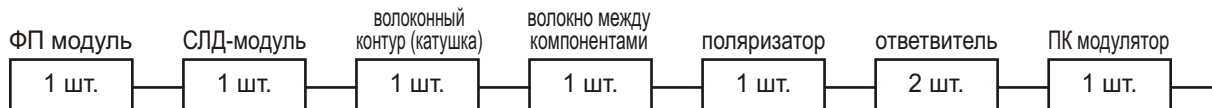
Использованные при расчете значения интенсивности отказов для основных компонентов и узлов оптического блока датчика основаны на информации от изготовителей и поставщиков оптических компонентов, а также на статистических данных, аккумулированных компанией “Физоптика” в процессе многолетнего производства волоконных датчиков вращения.

Расчет проводился с учетом внешних условий Ground Fixed Operation (GF) и для температуры окружающей среды +25 °С.

Надежностная схема волоконного датчика вращения выглядит следующим образом:



Надежностная схема оптического блока:



Надежностная схема блока электроники:



Интенсивность отказов компонентов блока электроники ОЕ141ФОС-3

Наименование компонента	Количество компонентов	Количество отказов за 1 млн. часов [$10^{-6}/ч$]
Диод	1	0.008
Транзистор	8	0.12
Микросхема	17	0.024
Конденсатор	60	0.016
Резистор	80	0.005
Полупроводниковый фотодиод	1	0.03
Пайки	350	0.0004

Интенсивность отказов компонентов оптического блока

Наименование компонента	Количество компонентов	Количество отказов за 1 млн. часов [$10^{-6}/ч$]
Фото-приемный модуль	1	1.5
СЛД	1	20
Волоконный контур (катушка)	1	0.5
Волокно между компонентами	1	1.5
Поляризатор	1	20
Ответвитель	2	1
Пьезокерамический модулятор	1	2.5

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ ДО ОТКАЗА

Используя вышеприведенные данные по интенсивности отказов отдельных компонентов получаем следующие результаты:

- для оптического блока:

$$OБ = 1 \cdot 1.5 + 1 \cdot 20 + 1 \cdot 0.5 + 1 \cdot 1.5 + 1 \cdot 20 + 2 \cdot 0.5 + 1 \cdot 2.5 = 47 [10^{-6}/ч]$$

- для блока электроники:

$$OЭ = 1 \cdot 0.008 + 8 \cdot 0.12 + 17 \cdot 0.024 + 60 \cdot 0.016 + 80 \cdot 0.005 + 1 \cdot 0.03 + 350 \cdot 0.0004 = 2.91 [10^{-6}/ч]$$

Можно отметить, что интегральная интенсивность отказов блока электроники более, чем на порядок меньше интегральной интенсивности отказов оптического блока. Это также хорошо согласуется со статистическими данными, полученными при эксплуатации датчиков.

Таким образом, дополнительная детализация данных таблицы с обобщенными для каждого типа компонентов значениями интенсивности отказов составляющих блока электроники (учет тонких особенностей режимов работы каждого компонента и т.п.) не требуется.

Для итоговой оценки среднего времени наработки до отказа волоконного датчика вращения на основе вычисленных интенсивностей отказов для двух основных блоков датчика получаем

$$T = 10^6 / (OБ + OЭ) = 20 \text{ тыс. час.}$$

ОЦЕНКА СРОКА СЛУЖБЫ

С точки зрения ограничения срока службы волоконного датчика вращения наиболее критичным компонентом является оптическое волокно, поскольку длинный кусок волокна (~ 100 м) находится внутри датчика в напряженном состоянии, что может приводить к росту микротрещин на его поверхности и в конечном итоге к разрушению волокна. Это явление называется статической усталостью стекла.

Для оценки срока службы оптического волокна обычно используют выражение

$$t = t_0 \left(\frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon} \right)^n,$$

где $n \approx 20$ – параметр статической усталости волокна, ε_{II} – относительное удлинение волокна при его перемотке под нагрузкой, ε – относительное удлинение волокна в процессе эксплуатации, t_0 – параметр, имеющий размерность времени.

Из приведенного выше соотношения следует, что если в процессе эксплуатации волокно удлинится до величины $\varepsilon = \varepsilon_{II}$, то его срок службы будет равен t_0 . Типичные значения этого параметра для отрезков волокна длиной **100 м** характеризуются величинами порядка секунды ($t_0 \approx 1 \text{ сек}$).

Однако, если проводить оценку срока службы волокна для случая, когда его относительное удлинение в процессе эксплуатации ε составляет **0.3** и менее от относительного удлинения волокна при его перемотке под нагрузкой ε_{II} , то получаемая величина превышает десятки лет из-за большой величины параметра статической усталости n в показателе степени соотношения для вычисления срока службы оптического волокна.

Срок службы волокна увеличивается при уменьшении его относительного удлинения в процессе эксплуатации ε и стремится к бесконечности при ε стремящемся к 0.

Таким образом, если в процессе хранения/эксплуатации волокна его относительное удлинение ε не превышает **0.3** ε_{II} , то срок службы в этом случае может быть оценен в десятки лет и более детальная оценка с практической точки зрения не требуется.

Деформация волокна в датчике вращения создается в процессе его изготовления (намотка чувствительного контура, укладка волокна и т.п.) и величина этой деформации сохраняется постоянной в течении всего периода хранения/эксплуатации датчика. Напряжение волокна возникает из-за того, что при намотке волокна на катушку или его укладке в корпус датчика волокно изгибается так, что внешний край оказывается длиннее оси волокна на πd , где d – диаметр кварцевой оболочки волокна. Учитывая, что длина одного витка волокна, намотанного на катушку диаметром D , равна примерно πD (при условии, что диаметр волокна в полимерном покрытии много меньше диаметра намотки), для относительного удлинения волокна ε получаем соотношение

$$\varepsilon = d/D.$$

В датчиках вращения используется волокно, которое при изготовлении (вытяжке) перематывается на транспортные бобины с натяжением порядка **40 г**, обеспечивающем при этом относительное удлинение волокна $\varepsilon_{II} = 0.5\%$. Чтобы обеспечить срок службы/хранения этого волокна более 15 лет, исходя из вышеизложенного, относительное удлинение волокна в процессе хранения/эксплуатации не должно превышать **0.15%**. Подставляя в соотношение для ε диаметр кварцевой оболочки волокна 40 мкм, получаем для минимально допустимого радиуса намотки волокна **D=2.5 см**, что соответствует типичным радиусам намотки волокна в малогабаритных датчиках компании “Физоптика”.

Таким образом, приведенные данные позволяют прогнозировать срок службы/хранения, превышающий 15 лет, для волоконных датчиков вращения компании “Физоптика”.