

БЕСКОНТАКТНЫЙ ДАТЧИК ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЙ ДЛЯ ЖЕСТКИХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Д. А. Рязанцев

Датчики для измерения динамических характеристик силовых установок изделий ракетно-космической техники (РКТ) являются важным звеном в решении проблем автоматизации систем управления и мониторинга сложными объектами [1,2]. Следует особо отметить применение указанных датчиков при поиске неисправностей и диагностике изделий РКТ в связи с тем, что частота вращения или биение валов силовой установки содержат большое количество информации об ее состоянии. Важность контроля динамических характеристик объясняется также и тем, что при работе двигательных установок во вращающихся узлах возникают силы инерции, которые могут привести к появлению напряжений, превышающих пределы прочности конструкции, а длительное воздействие инерционных сил может вызвать усталостное разрушение материала [3, 4]. В ОАО «НИИФИ» для применения в изделиях РКТ разработан ряд бесконтактных датчиков частоты вращения (ДЧВ) с использованием различных методов преобразования и отличающихся повышенной механической прочностью, расширенным диапазоном рабочих температур и надежностью.

Для более мощных двигательных установок предъявляются более жесткие условия эксплуатации. Для измерения частоты вращения вала при стендовых испытаниях, предстартовой подготовке и работе кислородно-водородного ТНА с осевым входом топлива в двигателях ракетно-космической техники ОАО «НИИФИ» разрабатывает ДЧВ, который должен измерять частоту вращения до 145 000 об/мин на расстоянии 20 мм до контролируемого вала в диапазоне температур от 83 до минус 253 °С.

ОАО «НИИФИ» изготавливает датчики частоты вращения индукционного и фотоэлектрического отражательного типа, а также магнитооптические датчики [5].

Датчики частоты вращения индукционного типа, в которых наводимая ЭДС находится в прямо пропорциональной зависимости от скорости изменения магнитного потока и расстояния до вращающегося объекта с ферромагнитными вставками, неприемлемы для измерения малых частот вращения на расстоянии, превышающем 2 мм.

Магнитооптические ДЧВ и фотоэлектрические ДЧВ отражательного типа измеряют частоту вращения с момента старта двигателя, однако имеющиеся аналоги таких датчиков измеряют частоту на расстоянии 6 мм до контролируемого вала.

На основании приведенных достоинств и недостатков в требуемых условиях эксплуатации разрабатывается фотоэлектрический волоконно-оптический ДЧВ отражательного типа [6].

Разрабатываемый волоконно-оптический ДЧВ отражательного типа, представленный на рис. 1, состоит из стального корпуса 2 с вваренным в него смотровым окном 1, волоконно-оптического жгута (ВОЖ) 3, включающего приемные и передающие волокна, фотодиода 4, светодиода 5 и соединителя 6.

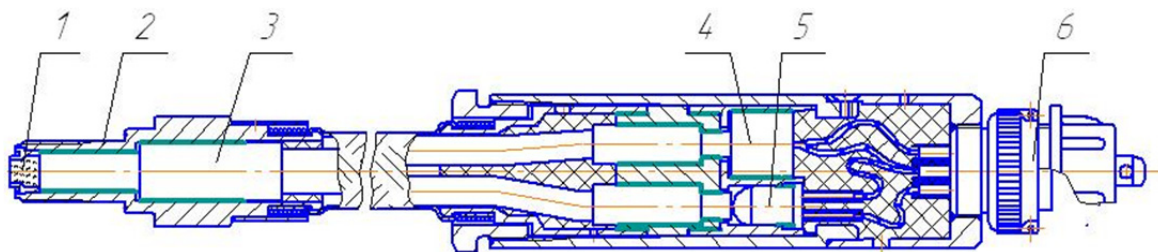


Рис. 1. Конструкция волоконно-оптического ДЧВ отражательного типа

Датчик работает следующим образом: с источника излучения по передающей части ВОЖ световой поток поступает через смотровое окно на вращающийся вал двигателя, на котором нанесена светоотражающая метка. Далее световой поток отражается от метки и поступает через смотровое окно на приемную часть ВОЖ, по которому световой поток идет на фотодиод. Фотодиод формирует электрические импульсы, пропорциональные частоте вращения вала.

Для обеспечения надежной работы датчика в условиях воздействия внешних факторов применены конструктивные и технологические решения, представленные ниже.

Герметичность датчика в месте установки на двигателе достигается применением герметичного соединения корпуса и смотрового окна. При проработке конструкции было испытано два варианта исполнения соединения корпуса со смотровым окном.

Первый вариант изготавливался с использованием стеклоцемента, который соединял стекло с корпусом. При проведении испытаний эта технология не дала требуемой герметичности.

Второй вариант исполнения изготавливался по технологии стеклоспая стекла С52-1 с металлической втулкой из сплава 29НК с последующей сваркой в корпус. Этот вариант при проведении испытаний оказался герметичным со стороны стекла. Для определения возможности использования данной конструкции в диапазоне температур от 83 до минус 253 °С было проведено компьютерное моделирование.

На рис. 2 изображены эпюры в разрезе распределения напряжений в корпусе датчика при воздействии давления и температуры в диапазоне от 83 до минус 253 °С.

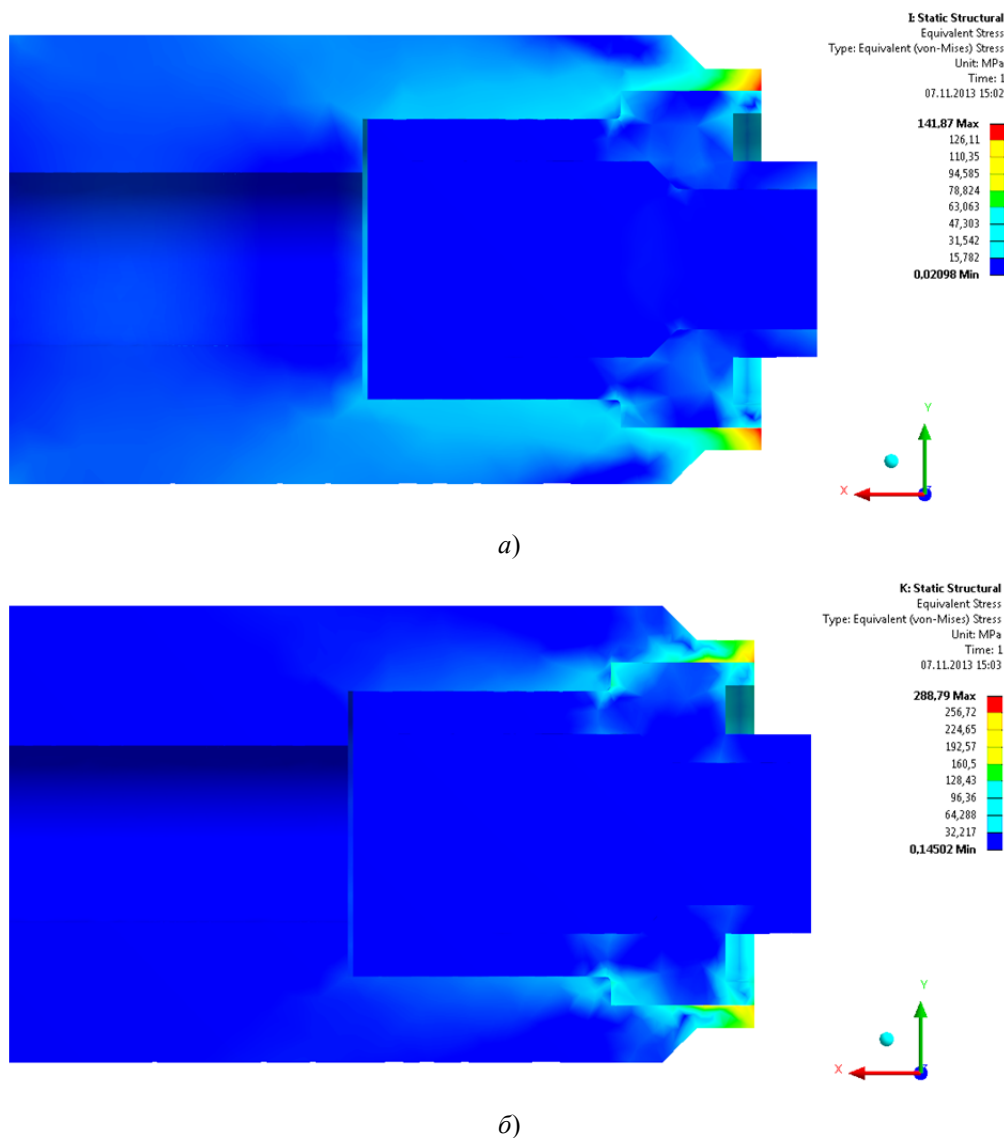


Рис. 2. Эпюра распределения напряжений в корпусе при воздействии давления 12,5 МПа и температур:
а – 83 °С; б – минус 253 °С

Согласно рис. 2 под действием внешних факторов максимальные напряжения возникают в корпусе, а именно, в местах сварного шва. Материал корпуса 12X18H10T имеет предел прочности 630 МПа. При воздействии температуры 83 °С в корпусе максимальные напряжения составляют 140 МПа, следовательно, коэффициент запаса прочности $k = 4,5$. При воздействии температуры минус 253 °С в корпусе максимальные напряжения составляют 290 МПа, следовательно, коэффициент запаса прочности $k = 2,1$. Благодаря использованию материалов стали 12X18H10T, сплава 29НЖ, стекла С52-1 с близкими по значению коэффициентами линейного расширения рассмотренная конструкция обеспечит стойкость к заданным воздействующим факторам.

Использование ВОЖ в качестве линии передачи светового потока к объекту измерения и обратно позволяет поместить электрорадиоизделия в условиях воздействия внешних факторов, облегченных по сравнению с условиями, воздействующими на корпус со смотровым окном.

Измерение частоты вращения до 145 000 об/мин обеспечивается использованием фотодиода с временем нарастания и спада $\tau = 100$ нс. Максимальная частота импульсов, поступающих на датчик, укомплектованный ротором с десятью метками, рассчитывается по формуле

$$f_{\Pi} = \frac{m n}{60},$$

где f_{Π} – максимальная частота импульсов (Гц); m – частота вращения вала (об/мин); n – количество меток на вале.

Максимальная частота импульсов, воспринимаемых фотодиодом, рассчитывается по формуле [7]:

$$f_{\Phi} = \frac{1}{2\pi\tau},$$

где f_{Φ} – максимальная частота импульсов, воспринимаемых фотодиодом; τ – время нарастания и спада фотодиода (нс).

Согласно приведенным формулам максимальная частота импульсов, воспринимаемых фотодиодом, на порядок выше максимальной частоты импульсов, поступающих на датчик, что подтверждает работоспособность датчика при частоте вращения до 145 000 об/мин.

Для обеспечения работоспособности датчика на расстоянии 20 мм до контролируемого вала следует увеличить выходной сигнал с фотодиода увеличением светового потока, поступившего на фотодиод, и включением фотодиода в режиме с обратным смещением. Повысить световой поток на фотодиод можно путем применения системы фокусирующих линз в среде распространения светового потока и минимизации потерь светового потока при вводе его в передающую часть ВОЖ. Система фокусирующих линз на участке от торца ПП до поверхности ротора не может быть использована из-за отсутствия возможности их крепления в полости турбонасосного агрегата двигателя РКТ.

Минимизация потерь светового потока при вводе его в ВОЖ реализована благодаря применению светодиода с узкой диаграммой направленности. Узкая диаграмма направленности, т.е. малый угол распространения светового потока светодиода, позволяет ввести излучение в ВОЖ под углом меньше апертурного, что увеличивает световой поток, поступивший на фотодиод.

Примененный светодиод имеет высокую мощность светового потока до 50 мВт, что также положительно влияет на увеличение светового потока, поступившего на фотодиод.

В настоящее время опытные образцы датчика прошли предварительные испытания, в том числе испытания на воздействие криогенных температур. Проведены испытания на подтверждение частотного диапазона на расстоянии 20 мм до вала, что подтверждает представленные результаты расчетов.

Благодаря высоким техническим характеристикам и стойкости к воздействию криогенных температур разрабатываемый датчик может заменить традиционные датчики частоты вращения в изделиях РКТ.

Список литературы

1. Функциональная модель информационной технологии обеспечения надежности сложных электронных систем с учетом внешних воздействий / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 184–187.

2. Затылкин, А. В. Алгоритмическое и программное обеспечение расчета параметров статически неопределимых систем амортизации РЭС / А. В. Затылкин, Г. В. Таньков, И. И. Кочегаров // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 33–40.
3. Северцев, Н. А. К вопросу об утрате работоспособности систем / Н. А. Северцев, А. В. Бецов, А. М. Самокутяев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 2. – С. 268–270.
4. Дивеев, А. И. Синтез оптимального закона управления потоками транспорта в сети автодорог на основе генетического алгоритма / А. И. Дивеев, Н. А. Северцев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – № 3. – С. 87.
5. Кирьянов, В. Л. Датчики частоты вращения для изделий ракетно-космической техники / В. Л. Кирьянов, В. Н. Колганов, Н. Д. Конаков, А. В. Куприянов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 28–31.
6. Удд, Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Э. Удд. – М. : Техносфера, 2008. – 520 с.
7. Аксененко, М. Д. Приемники оптического излучения : справочник / М. Д. Аксененко, М. Л. Бараночников. – М. : Радио и связь, 1987. – 296 с.

Рязанцев Дмитрий Андреевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8)
E-mail: sensor@niifi.ru

Аннотация. Представлен волоконно-оптический датчик частоты вращения отражательного типа, предназначенный для измерения частоты вращения до 145 000 об/мин на расстоянии 20 мм до контролируемого вала в криогенных температурах. Изложены основные принципы работы датчика, его конструкция, достигнутые технические характеристики и их теоретическое и практическое обоснование.

Ключевые слова: датчик частоты вращения отражательного типа; волоконно-оптический жгут; фотоприемник; источник излучения; стеклоспай; время нарастания и спада фотоприемника; диаграмма направленности светодиода.

Ryazantsev Dmitriy Andreevich

design engineer,
Research Institute of Physical Measurement
(440026, 8 Volodarsky street, Penza, Russia)

Abstract. The speed-of-rotation transducer of reflection type designed for measuring rotational speed up to 145 000 rpm at the distance of 20 mm from the tested shaft under cryogenic temperatures is presented. The general transducer operating methods, its design, obtained performance specifications and their theoretical and practical underpinning are stated.

Key words: speed-of-rotation transducer of reflection type; fiber-optic bundle; optical receiver; radiation emitter; glass seal; rise and fall time for optical receiver; LED direction pattern.

УДК.681.586.5

Рязанцев, Д. А.

Бесконтактный датчик частоты вращения вала, предназначенный для жестких условий эксплуатации / Д. А. Рязанцев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 98–101.