

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ

Худяков И.В.

Херсонское мореходное училище рыбной промышленности

Белоусов Е.В., Савчук В.П.

Херсонская государственная морская академия

Обосновывается выбор типа и конструктивные особенности датчика для контроля по характеру протекания рабочего процесса, способного в течение длительного времени работать в характерных условиях с точностью, необходимой для эффективного функционирования систем управления двигателем. Выявлен ряд преимуществ амплитудных оптоволоконных датчиков давления перед существующими тензорезистивными, индуктивными и емкостными. Эти преимущества обусловлены их принципом действия. Установлено, что на метрологические характеристики датчика более всего влияет величина силы затяжки мембраны и взаимное линейное и угловое расположение излучающих и приемных волокон.

Ключевые слова: амплитудный оптоволоконный датчик давления отражательного типа, оптоволоконная головка, индикаторный кран, мембрана.

Актуальность проблемы. Одним из основных параметров, отражающих режим работы и состояние судовых двигателей внутреннего сгорания (СДВС), является характер изменения давления внутри цилиндра. Трудность контроля этого параметра заключается в том, что чувствительный элемент датчика непосредственно соприкасается с рабочим телом, находящимся внутри цилиндра двигателя, и соответственно подвергается ряду физических и химических воздействий (коррозия, эрозия, высокая температура, высокое давление и т.д.). В настоящее время датчики, способные длительно и надежно работать в таких условиях, практически отсутствуют. Поэтому информация, необходимая для управления рабочим процессом в СДВС, собирается косвенным путем.

В условиях ужесточения требований к экологической безопасности и проблемы снижения расхода топлива при эксплуатации СДВС возникает необходимость использования узкоспециализированного датчика для получения первичной информации о характере протекания рабочего процесса двигателя. Такие датчики позволяют решить задачу формирования наиболее эффективного алгоритма управления двигателем путем установления адекватной обратной связи между системой управления и управляемым объектом (в рассматриваемом случае двигателем внутреннего сгорания).

Цель данной статьи состоит в обосновании выбора типа и конструкции амплитудного оптоволоконного датчика для систем управления двигателем, способного в течение длительного времени работать в условиях характерных для цилиндра двигателя, с удовлетворительной для поставленной задачи точностью.

Анализ литературных источников. Для исследования различных процессов в СДВС наибольшее распространение получили диафрагменные датчики, применяющиеся при измерениях как статических, так и динамических давлений. Теоретическая база этих датчиков достаточно хорошо рассмотрена в работах [1, 2]. Для преобразования измерительного сигнала в электрический традиционно используются тензометрические, индуктивные, емкостные и пьезоэлектрические преобразователи [2]. Альтернативой подобному подходу является использование оптоволоконных преобразователей, в которых измеряемый параметр преобразуется сначала в оптический, а затем в электрический сигнал [3, 4, 5].

Амплитудные оптоволоконные датчики давления (ОВДД) имеют определенные преимущества перед существующими тензорезистивными, индуктивными и емкостными такие, как нечувствительность к электромагнитным полям, вибрации, агрессивным средам, пожаро-, взрыво-, электробезопасность. Это обусловлено их принципом действия, заключающимся в перераспределении светового потока между подводщими

и отводящими свет оптическими волокнами из-за перемещения под действием давления деформируемого зеркала. Это зеркало, играющее роль чувствительного элемента ОВДД, может быть изготовлено из материалов и с помощью методов, применяющихся при изготовлении изделий микроэлектроники. Материалы и методы в настоящее время хорошо отработаны, что позволяет получать совершенные конструкции датчиков при минимуме затрат на разработку, а прогресс в материаловедении и технологии позволяет надеяться на применение оптических волокон в интегральном исполнении.

Результаты измерений, полученных с помощью амплитудных оптоволоконных датчиков просто анализировать, в том числе с помощью средств вычислительной техники.

Одной из простейших конструкций амплитудного датчика является схема, где перемещение диафрагмы моделирует интенсивность отраженной световой волны [7, 8, 9].

В существующей литературе имеется мало сведений о проектировании амплитудных ОВДД как об универсальной последовательности операций, позволяющей разработать конструкцию, удовлетворяющую требованиям к датчикам непрерывного действия для заданных условий работы. Имеющиеся сведения носят оценочный характер или относятся к конкретным приборам, из чего не ясно, как повлияет изменение в конструкции ОВДД на его метрологические и эксплуатационные характеристики [1–5]. В данной работе рассматриваются основные этапы проектирования амплитудных оптоволоконных датчиков давления.

Решение проблемы. Принцип действия амплитудных ОВДД рефлектометрического типа заключается в изменении интенсивности потока оптического излучения при отражении его от перемещающейся под действием давления упругой мембраны. Поэтому при проектировании амплитудных ОВДД исходят из анализа перемещения мембраны относительно неподвижных оптических волокон. в отличие от тензорезистивных датчиков, при проектировании которых важно учитывать изменение механических напряжений в упругих элементах или изменение емкости конденсатора с подвижной обкладкой в емкостных датчиках.

При изготовлении мембран часто применяются прецизионные сплавы, для которых имеются отработанные технологии обработки поверхности и формирования трехмерных структур. Учитывая область применения чувствительного элемента датчика для рассматриваемой области применения, для изготовления мембран наиболее целесообразно использовать легированную сталь 36ХНТЮ.

В рамках данного исследования рассматривался амплитудный ОВДД отражательного типа, предел намерений которого составляет от 0...30 МПа. Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в среде SolidWorks, которая последнее время получила широкое распространение для моделирования датчиков и их элементов.

Конструкция датчика (рис. 1) состоит из нескольких частей. Через соединительный канал корпуса датчика (4) рабочее тело воздействует на мембрану (7), размещенную в корпусе (4), который имеет резьбовое соединение для крепления втулки (5) для прижима мембраны. Для стабилизации температурного режима датчика предусмотрена полость циркуляции охлаждающей жидкости в рубашке (6). В световой головке (2) располагается оптоволоконный жгут, по которому к мембране подводится оптический сигнал от полупроводникового светоизлучателя, и снимается отраженный сигнал с помощью светоприемника, который так же расположен в световой головке (2).

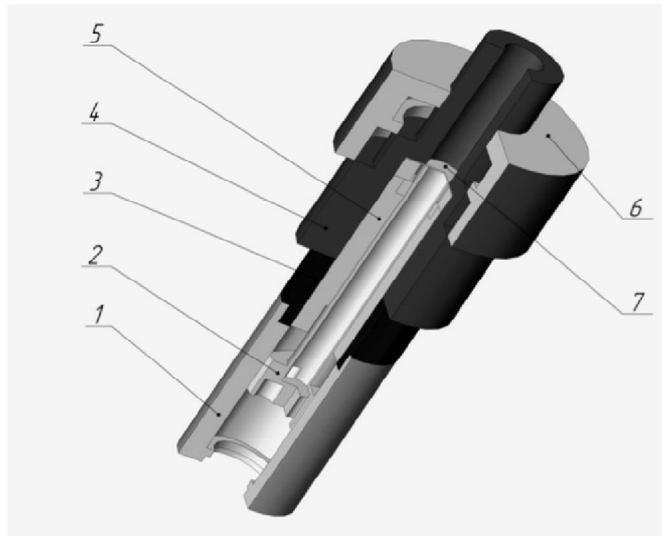


Рисунок 1 – Трехмерная модель амплитудного ОВДД отражательного типа:
 1 – кожух; 2 – световая головка; 3 – стакан; 4 – корпус; 5 – втулка; 6 – рубашка; 7 – мембрана

Принципиальная схема датчика показана на рис. 2. Чувствительным элементом является плоская диафрагма (6), защемленная между двух половин корпуса (1). Для снятия и преобразования измерительного сигнала используется оптоволоконная головка, состоящая из корпуса (2) и раздвоенного оптоволоконного жгута (5). На торцах раздвоенной части жгута располагаются светоизлучатель (3) и фотоприемник (4). Противоположный конец жгута устанавливается на некотором удалении от диафрагмы. Волокна, по которым подводится свет и отводится отраженный сигнал по торцевой поверхности жгута, распределяются равномерно [4].

При прогибе мембраны угол отражения света от ее поверхности изменяется, в результате чего часть света рассеивается, не попадая в фотоприемные волокна. В результате мощность светового потока, воздействующего на светочувствительный элемент, уменьшается пропорционально величине прогиба диафрагмы [4].

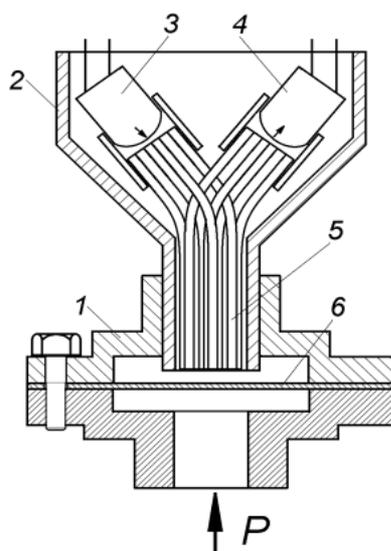


Рисунок 2 – Общая схема оптоволоконного датчика давления

Одна из основных задач, которая решалась при проектировании мембраны, – получить ее упругую характеристику максимально близкой к линейной. Очевидно, чем меньше нелинейность, тем проще и дешевле регистрирующая электронная часть датчика, обрабатывающая сигнал.

Одним из важных параметров, влияющих на напряженно-деформированное

состояние мембраны, является величина силы затяжки. В соответствии с проводимыми ранее исследованиями, ниже приводится график зависимости оптического зазора от величины затяжки мембраны.

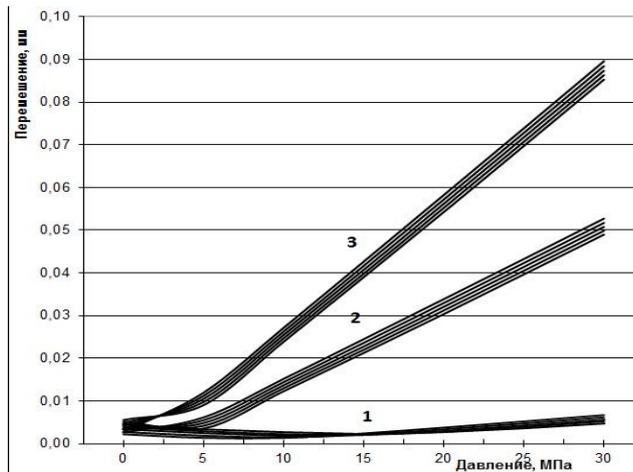


Рисунок 3 – График изменения оптического зазора от величины затяжки для расчетных точек:
 1 – семейство кривых для расчетной точки 1; 2 – семейство кривых для расчетной точки 25;
 3 – семейство кривых для расчетной точки 51

Из графика на рис. 3 видно, что изменение оптического зазора в окрестностях расчетной точки 5 (0,495 мм) носит нелинейный характер, что можно объяснить наличием в этой зоне (по периферии мембраны) напряженного состояния, возникающего вследствие затяжки мембраны.

В окрестностях точек 25 (2,475 мм) и 51 (5,049 мм) наличие деформированного состояния приводит к тому, что в диапазоне измерения давления от 0 МПа до 5 МПа для точки 51 и от 0 МПа до 8 МПа для точки 25 изменение оптического зазора носит нелинейный характер. Причем величина нелинейности усиливается с увеличением силы затяжки мембраны.

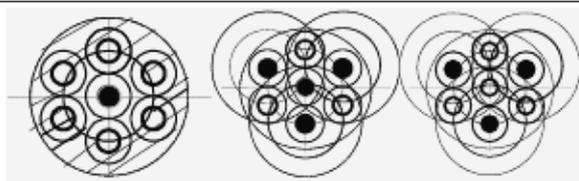
Исходя из проведенного исследования следует, что затяжку необходимо минимизировать, однако, не нарушая герметичности датчика. Возможно применение чувствительного элемента (ЧЭ) в виде стакана, однако это очень сложно с точки зрения технологического процесса изготовления. Более простым способом является использование ЧЭ в виде мембраны с тарированной затяжкой и использованием различного рода уплотнений (прецизионное прилегание плоскостей, применение высокотемпературного герметика и т.д.).

Следующим важным фактором при проектировании ОВДД является технология создания оптоволоконной головки.

Тип, размеры, количество оптических волокон (ОВ), их взаимное расположение в торцах ОВ кабеля, изгибы кабеля существенно влияют на метрологические характеристики ОВДД.

Коаксиальное расположение ОВ в жгуте получило наибольшее распространение как наиболее простое по технологии изготовления. Одновременно оно наиболее целесообразно с точки зрения управления световым потоком. Изменение взаимного расположения излучающих ОВ (ИОВ) и приемных ОВ (ПОВ) в жгуте ОВ кабеля дает возможность изменять глубину модуляции оптического сигнала и чувствительность преобразования ОВД.

На рис. 4 приведены варианты взаимного расположения ИОВ и ПОВ в общем торце ОВ кабеля.



а) б) в)

Рисунок 4 – Взаимное расположение излучающих и приемных волокон в общем торце ОВ кабеля ОВД отражательного типа

Дана оценка эффективности каждой из возможных схем расположения ОВ, для чего принят ряд допущений: мощность отраженного светового потока $P_{пр}$, поступающего в каждое ПОВ от каждого ИОВ, принимается за условную единицу, т.е. $P_{пр}=1$; мощности излучения любого ИОВ равны между собой; диаграмма распределения светового потока на торце любого ИОВ симметричная и равномерная. Тогда:

$$\Sigma P_{пр} = \Sigma n P_{пр},$$

где n – количество ОВ.

1. Для первой схемы (рис. 4а): $\Sigma P_{пр} = 6 \times 1 = 6$ у. е.
2. Для второй схемы (рис. 4б): $\Sigma P_{пр} = 3 \times 3 = 9$ у. е.
3. Для третьей схемы (рис. 4в): $\Sigma P_{пр} = 3 \times 2 + 1 \times 3 = 9$ у. е.

Таким образом, при одном и том же количестве ОВ в жгуте, равном семи, эффективность варианта б и в в 1,5 раза выше варианта а. Именно такое расположение волокон в общем торце ОВ кабеля обеспечивает максимальную чувствительность преобразования и выходную мощность оптического сигнала, так как каждое из ПОВ дает максимальный вклад в отклик приемника излучения.

Немаловажная проблема, которая возникает при проектировании, – выбор места для штатного крепления датчика. В настоящее время единственным местом установки может быть индикаторный кран. Однако он выполняет неотъемлемые функции при эксплуатации СДВС (продувка, вентиляция цилиндров и т.д.), исключить которые из процесса эксплуатации нельзя.

Эту проблему можно решить с помощью применения специальных переходников, как показано на рис. 5.

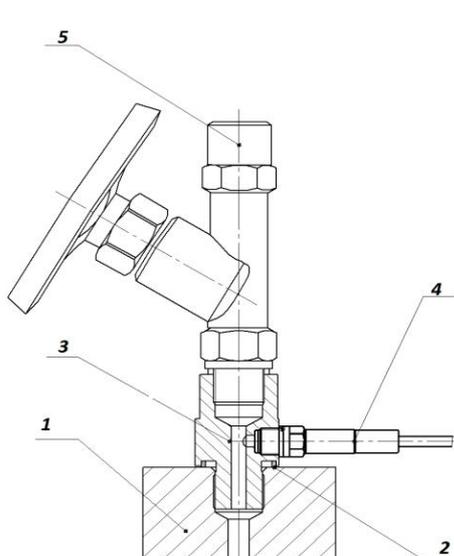


Рисунок 5 – Вариант установки ОВД давления на индикаторный кран СДВС: 1 – корпус; 2 – прокладка; 3 – переходник; 4 – датчик давления; 5 – кран индикаторный

Данное крепление можно использовать во время проведения исследований. Впоследствии для применения данного датчика давления возможна проектировка специального штуцера в крышке цилиндра СДВС для штатного подключения.

Выводы

1. Для мониторинга характера изменения давления рабочей среды в цилиндре СДВС в реальном времени наиболее простым и экономически эффективным является применение амплитудных ОВД рефлектометрического типа.

2. На метрологические характеристики датчика влияет значительное число параметров таких, как длина, удельные потери, форма и геометрические размеры волокон, величина силы натяжки мембраны, взаимное линейное и угловое расположение излучающих и приемных волокон; два последних фактора оказывают наибольшее влияние.

3. Наиболее существенный вклад в погрешности измерения, обусловленные изменениями температуры окружающей среды, из всей схемы электронной обработки вносят полупроводниковые приборы, используемые как источники и приемники оптического излучения. Для устранения данной погрешности в конструкцию датчика включена схема термостабилизации.

4. Проблему выбора штатного крепления датчика можно решить с помощью применения специальных переходников, установленных на индикаторном кране.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусурин В. И. Волоконно-оптические датчики : физические основы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. – М. : Энергоатомиздат, 1990.

2. Окоси Т. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси. – Л. : Энергоатомиздат, 1990.

3. Зак Е. А. Волоконно-оптические преобразователи с внешней модуляцией / Е. А. Зак. – М. : Энергоатомиздат, 1989.

4. Белоусов Е. В. Опыт создания оптоволоконных датчиков для индицирования рабочего процесса двигателей / Е. В. Белоусов, В. П. Савчук, А. Д. Штанько // Грузовик & : Строительно-дорожные машины, автобус, троллейбус, трамвай. – М. : Машиностроение, № 12. – 2007.

5. Vaganov V. I. Construction problems in sensors // Sensors and actuators. – 1991. – A. 28. – P. 161-172.

6. Зак Е. А. Особенности проектирования рефлектометрических ВОД перемещений / Е. А. Зак, А. Л. Тув // Измерительная техника. – 1997. – № 1. – С. 28-30.

7. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – Л. : Энергоатомиздат, 1988.

8. Бялик А. Д. Особенности преобразовательных характеристик амплитудных волоконно-оптических датчиков давления рефлектометрического типа / А. Д. Бялик // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2009. – № 1 – С. 338-341.

9. Бурков В. Д. Дифференциальные волоконно-оптические датчики давления отражательного типа / В. Д. Бурков, Л. Н. Коломиец // Сб. докладов НТК профессорско-преподавательского состава и аспирантов МГУЛ [Москва, 30 января–1 февраля 2007]. – С. 42.

REFERENCES

1. Busurin V. I. Volokonno-opticheskie datchiki : fizicheskie osnovih rascheta i primeneniya / V. I. Busurin, Yu. R. Nosov. – M. : Ehnergoatomizdat, 1990.

2. Okosi T. Volokonno-opticheskie datchiki / T. Okosi. – L. : Ehnergoatomizdat, 1990.

3. Zak E. A. Volokonno-opticheskie preobrazovateli s vneshneyj modulyaciey / E. A. Zak. – M. : Ehnergoatomizdat, 1989.

4. Belousov E. V. Opiht sozdaniya optovolokonnihkh datchikov dlya indicirovaniya rabocheho processa dvigateleyj / E. V. Belousov, V. P. Savchuk, A. D. Shtanjko // Gruzovik & : Stroiteljno-dorozhnihe mashin, avtobus, trolleyjbus, tramvaj. – M. : Mashinostroenie, № 12. – 2007.

5. Vaganov V. I. Construction problems in sensors // Sensors and actuators. – 1991. – A. 28. – P. 161-172.
6. Zak E. A. Osobennosti proektirovaniya reflektometricheskikh VOD peremetheniyj / E. A. Zak, A. L. Tuv // Izmeriteljnaya tekhnika. – 1997. – № 1. – S. 28-30.
7. Gutnikov V. S. Integraljnaya ehlektronronika v izmeriteljnihkh ustrojstvakh / V. S. Gutnikov. – L. : Ehnergoatomizdat, 1988.
8. Byalik A. D. Osobennosti preobrazovateljnihkh kharakteristik amplitudnihkh volokonno-opticheskikh datchikov davleniya reflektometricheskogo tipa / A. D. Byalik // Nauchnihe problemih transporta Sibiri i daljnogo vostoka. – 2009. – № 1 – S. 338-341.
9. Burkov V. D. Differencialjnihe volokonno-opticheskie datchiki davleniya otrazhatelnogo tipa / V. D. Burkov , L. N. Kolomic // Sb. dokladov NTK professorsko-prepodavateljskogo sostava i aspirantov MGUL [Moskva, 30 yanvarya–1 fevralya 2007]. – S. 42.

Худяков І.В., Білоусов Є.В., Савчук В.П. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ АМПЛІТУДНИХ ОПТОВОЛОКОННИХ ДАТЧИКІВ

Обґрунтовується вибір типу і конструктивні особливості датчика для контролю за характером протікання робочого процесу, здатного впродовж тривалого часу працювати в характерних умовах з точністю, необхідною для ефективного функціонування систем управління двигуном. Виявлений ряд переваг амплітудних оптоволоконних датчиків тиску перед існуючими тензорезистивними, індуктивними і ємнісними. Ці переваги обумовлені їх принципом дії. Встановлено, що на метрологічні характеристики датчика понад усе впливає величина сили затягування мембрани і взаємне лінійне і кутове розташування випромінюючих і приймальних волокон.

Ключові слова: амплітудний оптоволоконний датчик тиску відбивного типу, оптоволоконна голівка, індикаторний кран, мембрана.

Khudiakov I.V., Belousov Ye.V., Savshuk V.P. SPECIFICS OF FIBER OPTIC AMPLITUDE SENSORS DESIGNING

Substantiates the choice of type and design features of the sensor for control of character of the workflow that can run for a long time in specific terms of accuracy necessary for the efficient operation of engine control system. Discovered several advantages of amplitude fiber optic pressure sensors over existing tensor resistive, inductive and capacitive. These advantages due to their principle of operation. It was discovered that the metrological characteristics of the sensor over all affect the tightening force of membrane and mutual linear and angular arrangement emitting and receiving fibers.

Keywords: amplitude fiber optic pressure sensor of the reflective type, fiber optic head, indicator valve, membrane.

© Худяков І.В., Білоусов Є.В., Савчук В.П.

Статтю прийнято
до редакції 16.03.15