

при случайном нагружении перегрузки сжатием оказывают такое же влияние, укорачивая остаточный ресурс конструкции.

Выводы

Анализ результатов исследований, посвященных влиянию нерегулярного характера нагружения на кинетику трещины, показал следующее:

1) кинетика макротрещины в условиях нерегулярного характера внешних нагрузок существенно отличается от случая роста трещины при переменной нагрузке с неизменными параметрами цикла и зависит от множества факторов, таких как механические свойства материала, геометрии конструктивного элемента/образца, вида нагружения, параметров цикла нагружения (коэффициентов асимметрии и величин размаха КИН базового и цикла перегрузки, знака перегрузки, число и последовательность блоков перегрузки и другие);

2) поведение трещины после разовой перегрузки растяжением приводит к последующему снижению СРТ, а при блочной перегрузке растяжением этот эффект усиливается. Количество циклов в блоке и длительность между блоками также влияют на последующую кинетику трещины;

3) протяженность зоны торможения не имеет устойчивой связи с размером пластической зоны передтрещиной и может быть, как больше, так и меньше ее размера;

4) воздействие перегрузки сжатием приводит в большинстве случаев к противоположному эффекту, а именно – к увеличению СРТ. Блочной воздействие перегрузкой сжатия аналогично эффекту, описанному в п.2, но с обратным знаком;

5) сочетание единичных или блочных воздействий циклами перегрузок разного знака зависит от их последовательности, но при этом воздействие перегрузкой растяжения превалирует при равенстве остальных параметров над перегрузкой сжатием;

6) точность прогнозирования долговечности конструктивного элемента с трещиной зависит от адекватности феноменологической модели, положенной в основу расчета, учитывающей все

разнообразие поведения трещины при нерегулярном нагружении.

Литература

1. Skorupa, M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading—a literature review. Part I: empirical trends / M. Skorupa // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1998. – Vol. 21. – P. 987 – 1006.
2. Sander, M. Fatigue crack growth under variable amplitude loading. Part I: experimental investigations / M. Sander, H. A. Richard // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*—2006.—Vol.29.—P.291–301.
3. Naithani, R. Estimation of wave spectral shapes using ANN / R. Naithani, M.C. Deo // *Advances in Engineering Software*.— 2005. - Vol. 36, № 11 - 12. – P. 750 - 756.
4. Ribeiro, A.S. Variable amplitude fatigue crack growth modelling / A.S.Ribeiro, A.P.Jesus, J.M.Costa, L.P.Borrego, J.C. Maeiro // *Mecânica Experimental*. – 2011. – Vol.19. – P. 33-44.
5. Laseure, N. Effects of variable amplitude loading on fatigue life / N. Laseure, I. Schepens, N. Micone, W. De Waele // *International Journal of Sustainable Construction and Design*. – 2015. – Vol. 6, № 3.

References

1. Skorupa, M. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading—a literature review. Part I: empirical trends / M. Skorupa // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1998. – Vol. 21. – P. 987 – 1006.
2. Sander, M. Fatigue crack growth under variable amplitude loading. Part I: experimental investigations / M. Sander, H. A. Richard // *Fatigue Fracture Eng. Mater. Struct.* – 2006. – Vol.29. - P. 291 – 301.
3. Naithani, R. Estimation of wave spectral shapes using ANN / R. Naithani, M.C. Deo // *Advances in Engineering Software*.— 2005. - Vol. 36, № 11 - 12. – P. 750 - 756.
4. Ribeiro, A.S. Variable amplitude fatigue crack growth modelling / A.S.Ribeiro, A.P.Jesus, J.M.Costa, L.P.Borrego, J.C. Maeiro // *Mecânica Experimental*. – 2011. – Vol.19. – P. 33-44.
5. Laseure, N. Effects of variable amplitude loading on fatigue life / N. Laseure, I. Schepens, N. Micone, W. De Waele // *International Journal of Sustainable Construction and Design*. – 2015. – Vol. 6, № 3.

УДК 621.436

DOI: 10.34046/aumsuomt93/13

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДШИПНИКОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

А. Ю. Самойленко, доктор технических наук, доцент

В.А. Туркин, доктор технических наук, профессор

В статье приводятся параметры известных и перспективных средств эксплуатационного мониторинга подшипников судовых дизелей. Из-за существенного возрастания давлений в цилиндре дизелей условия работы подшипников ужесточились, что требует их непрерывного температурного контроля. В

основу методики контроля положено преобразование сигнала датчика температуры в частотный сигнал подвижного электронного блока. Этот сигнал посредством трансформаторной связи передается на неподвижный блок и затем обрабатывается.

Рассмотрены кинематическая, конструктивная и структурная схема одного из первых вариантов такого устройства под названием БУКТ-К, рассчитанного на две точки контроля. Отмечено, что практически идентичная по конструкции, структуре и параметрам система контроля температуры подшипников предложена фирмой Kongsberg, Норвегия, под маркой "GB10".

Перспективным средством мониторинга температуры подшипников является система SENTRY GB100. Она использует технологию поверхностных акустических волн, имеет простую конструкцию, ее датчик не требует для работы подведения энергии, не подвержен износу и старению.

Наибольшими возможностями для мониторинга обладает разработанная соавтором статьи система Термокопт. По сравнению с другими, она обеспечивает контроль температуры в нескольких точках, в диапазоне до 600⁰С, при погрешности не более ±0,16%.

Для специалистов в области автоматики и диагностики судовых дизелей.

Ключевые слова: дизель судовой, подшипники, мониторинг температуры, методика, терморезистор, поверхностная акустическая волна, термопара

The article presents the parameters of the known and promising means of operational monitoring of marine diesel bearings. Due to a substantial increase of pressure in the cylinder of diesel engines working conditions under-lipnikov tightened, which requires a continuous temperature control. The control technique is based on the transformation of the temperature sensor signal into the frequency signal of the mobile electronic unit. This signal is transmitted by means of a transformer connection to a stationary unit and then processed.

The kinematic, structural and structural scheme of one of the first variants of such a device called БУКТ-К, designed for two control points, is considered. It is noted that almost identical in design, structure and parameters of the bearing temperature control system offered by Kongsberg, Norway, under the brand name "GB10". A promising means of monitoring the bearing temperature is the SENTRY GB100 system. It uses the technology of surface acoustic waves, has a simple design, its sensor does not require energy for operation, is not subject to wear and aging.

The Thermocont system developed by the author has the greatest possibilities for monitoring. In comparison with others, it provides temperature control at several points, in the range up to 600 °C, with a sinfulness of not more than ±0,16%.

For specialists in the field of automation and diagnostics of marine diesel engines.

Keywords: diesel marine, bearings, temperature monitoring, methodology, thermistors, surface acoustic wave, thermocouple.

Постановка задачи

Развитие мирового судового дизелестроения характеризуется постепенным и непрерывным повышением параметров рабочего процесса дизелей, в частности, среднего индикаторного давления и максимального давления. Так в последних моделях судовых малооборотных дизелей (МОД) фирмы *MAN B&W* среднее индикаторное давление достигло уровня 20 бар, а максимальное давление – 140...160 бар [1]. По сравнению с аналогичными параметрами судовых МОД периода 80-х годов 20-го столетия увеличение составило почти 1,5 раза. Тенденция дальнейшего, возможно в меньшем темпе, роста указанных параметров будет, по-видимому, сохраняться в обозримый период.

Это обстоятельство, наряду с повышением агрегатных мощностей судовых МОД, естественным образом повысило уровень тепловой и механической напряженности дизеля. Особенно в сильной степени это отразилось на условиях работы подшипников дизеля. По данным Норвежского классификационного общества *DNV* на подшипники судовых среднеоборотных дизелей за

период 1990...1996 гг. приходилось около 30% всех повреждений дизелей [12].

Наряду с совершенствованием технологии изготовления подшипников, для повышения их надежности, дизелестроительные фирмы обратили также пристальное внимание на разработку технических средств для оперативного эксплуатационного контроля (мониторинга) режима работы и технического состояния подшипников. Длительное время единственным таким средством контроля являлся детектор масляного тумана, который стал обязательным в системе автоматизации дизеля и признан в таком качестве всеми мировыми классификационными обществами, надзирающими за постройкой морских судов.

Однако, как известно, детектор масляного тумана контролирует режим работы подшипников косвенно, реагируя на увеличение концентрации паров масла в картере при перегреве подшипника. Поэтому, неизбежно его реакция на перегрев подшипников становится в той или иной мере запоздалой. Это требует весьма тонкой настройки детектора, что не исключает, впрочем, его ложных срабатываний, как устройства за-

щиты. В связи с этим возникла необходимость замены или дополнения детектора масляного тумана другими, более информативными и оперативными средствами контроля режима работы подшипников.

Внедрение новых технических средств мониторинга в значительной степени затруднено технической сложностью задачи, поскольку речь идет о подвижных узлах дизеля – о мотылевом и головном (крейцкопфный в МОД) подшипниках. Особое значение приобретает вопрос обеспечения надежности и ресурса таких средств.

Методика бесконтактного контроля параметров подвижных узлов дизеля

Радикальное решение проблемы надежности средств контроля возможно при бесконтактном способе съема информации с подвижного узла. При этом датчик непосредственно установлен в контролируемой точке, а вырабатываемый им сигнал определенным образом преобразуется в подвижном блоке (ПБ), находящемся на подвижном узле, и через бесконтактные токосъемники передается к неподвижному блоку (НБ). Анализ известных технических решений показал [7], что для условий мониторинга подвижных узлов дизеля, характеризующихся значительным уровнем загрязнений остатками нефтепродуктов, целесообразна структурная схема системы бесконтактной передачи информации (рисунок 1), в которой ПБ содержит частотный преобразователь с подключенным к нему датчиком, приемную часть индуктивного токосъемника питания (ТП) и передающую часть токосъемника информационного сигнала (ТИ).

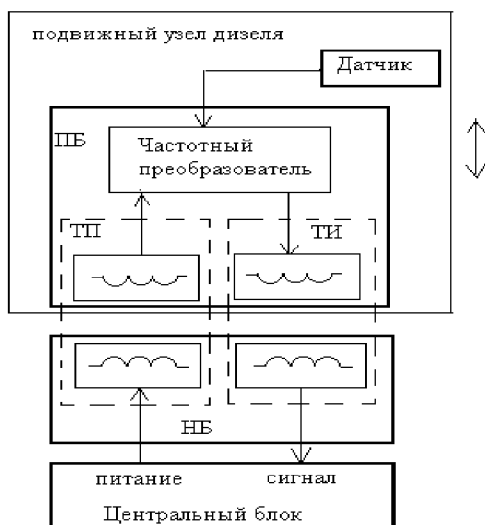


Рисунок 1 – Обобщенная схема системы бесконтактной передачи информации с подвижного узла дизеля

Неподвижный блок содержит передающую часть индуктивного токосъемника питания ТП и

приемную часть токосъемника информации ТИ. Центральный блок (ЦБ) обеспечивает питанием ПБ и обрабатывает информационный сигнал. С учетом конструкции дизеля связь ПБ и НБ через токосъемники носит импульсный, прерывистый характер, на коротком участке траектории движения подшипника.

Контроль температуры крейцкопфных подшипников

Одним из соавторов данной статьи был разработан ряд опытных образцов технических средств температурного контроля подвижных узлов дизеля [5], [3, 5, 6...8]. Все они прошли экспериментальную проверку на судовых дизелях. Среди них - опытный образец устройства для бесконтактного измерения температуры крейцкопфных подшипников (БУКТ-К) судового МОД.

Устройство содержит ПБ, крепящийся на верхней головке шатуна, и НБ, устанавливаемый в картере (рисунок 2). К подвижному блоку подключены два датчика температуры, устанавливаемые в нижних вкладышах носового и кормового подшипников крейцкопфа. Ввиду невысокого уровня температур и с целью обеспечения высокой чувствительности в качестве датчиков использованы термисторы, обеспечивающие контроль температур в диапазоне от 30 до 100 градусов Цельсия.

Устанавливаемый на подшипнике (верхняя головка шатуна) ПБ движется по сложной траектории эллипсоидного вида (рисунок 2). При движении ПБ испытывает также угловое перемещение, что следует из анализа кинематики схемы. Подвижный блок совмещается с НБ в некотором диапазоне углов ПКВ, проходя мимо НБ с зазором.

Реализация представленной на рисунке 2 схемы потребовала решения задачи определения параметров движения и взаимной ориентации ПБ и НБ. С учетом конструктивных особенностей дизеля время Δt взаимодействия ПБ и НБ ограничено и определяется скоростью V перемещения ПБ и длиной h его активного хода, в течение которого осуществляется взаимодействие.

Временной интервал Δt не может быть задан меньше некоторого минимального значения, достаточного для съема сигнала с ПБ. В связи с этим возникает задача выбора такого взаимного расположения ПБ и НБ, при котором обеспечивается требуемое Δt . Данная задача решена автором при установке ПБ в любой точке кривошипно-шатунного механизма дизеля [4], метод решения неоднократно апробирован на реальных образцах оборудования.

Расположение элементов токосъемников в ПБ и НБ показано на рисунок 3. Конструктивно ПБ и НБ выполнены одинаково, в корпусах прямоугольной формы, и предусматривают плоскопараллельное относительное перемещение. Одна из поверхностей корпуса является рабочей, через которую и осуществляется взаимодействие блоков при совмещении их в пространстве. Токосъемник питания состоит из двух одинаковых частей, размещаемых в ПБ и НБ. Каждая часть содержит Ш-образный ферритовый магнитопровод, на крайних стержнях которого намотаны одинаковые обмотки $L1, L2$ и $L3, L4$. В ПБ эти секции

образуют вторичную, а в НБ – первичную обмотку токосъемника питания. Торцы стержней магнитопроводов установлены заподлицо с рабочей поверхностью блока. Магнитный поток, создаваемый током первичной обмотки, замыкается через двойной воздушный зазор δ и крайние стержни (рисунок 3,а). При перемещении время взаимодействия блоков (и подачи питания), наряду со скоростью перемещения, определяется размером h магнитопровода, зазором δ и относительным боковым смещением блоков.

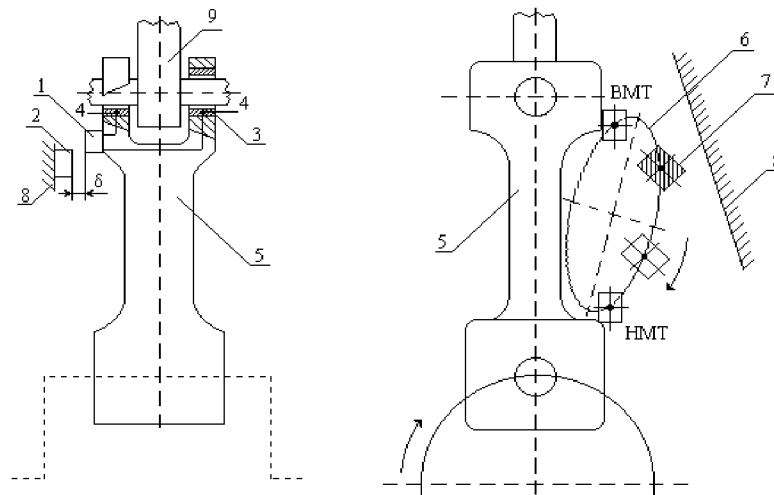


Рисунок 2 – Схема установки ПБ на шатуне и траектория его движения:
1 – ПБ; 2 – НБ; 3 – баббитовый вкладыш подшипника; 4 – терморезисторы; 5 – шатун; 6 – траектория движения ПБ; 7 – ориентация ПБ при его совмещении с НБ; 8 – остов двигателя; δ – зазор между ПБ и НБ; 9 – шток поршня.

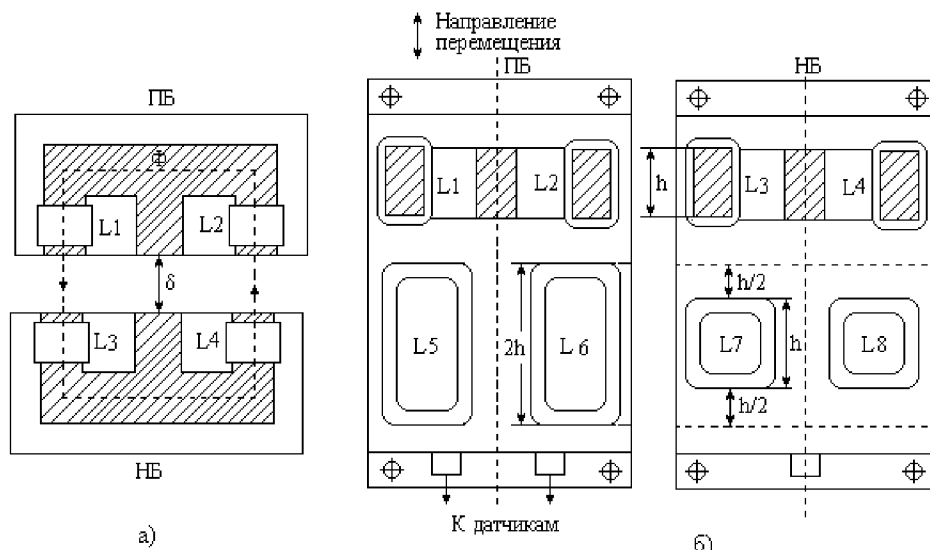


Рисунок 3 – Конструкция токосъемников подвижного и неподвижного блоков:
а – поперечный разрез; б – расположение катушек блоков в плане

Например, при использовании магнитопровода типоразмера Ш20×28 надежное питание ПБ обеспечивается при зазоре до 4 мм и перемещении блоков относительно друг друга на ± 20 мм.

Токосъемник информации (см. рисунок 3) выполнен в виде двух независимых каналов индуктивной связи, каждый из которых содержит передающую катушку в ПБ ($L5, L6$) и приемную в

НБ ($L7, L8$). Катушки имеют плоскую конструкцию, без магнитопровода, разнесены в пространстве и максимально приближены к рабочим поверхностям блоков.

Структурная схема ПБ и НБ приведена на рисунке 4. В подвижном блоке датчики температуры R_{t1} и R_{t2} подключены каждый к своему индивидуальному преобразователю “сопротивление-частота”, работающему на передающие катушки $L6$ и $L5$ токосъемников информации. Оба преобразователя питаются от общего канала питания, включающего вторичные обмотки $L1$ и $L2$ токосъемника питания ТП, выпрямитель с фильтром и стабилизатор. Частотные сигналы с ПСЧ через то-

косъемники ТИ1 и ТИ2 поступают к расположенному в НБ коммутатору, выполненному на герконе $K1$ с катушкой его управления $L9$. Коммутация геркона осуществляется по сигналу центрального блока, подключающего тот или иной токосъемник информации к НБ.

Опытный образец БУКТ-К в течение порядка 500 часов успешно прошел испытания на судовом МОД 8RND90, обеспечивая оперативный эксплуатационный контроль крейцкопфного подшипника в двух точках и аварийно-предупредительную сигнализацию в диапазоне 30...100 градусов Цельсия при погрешности 2 градуса Цельсия [8].

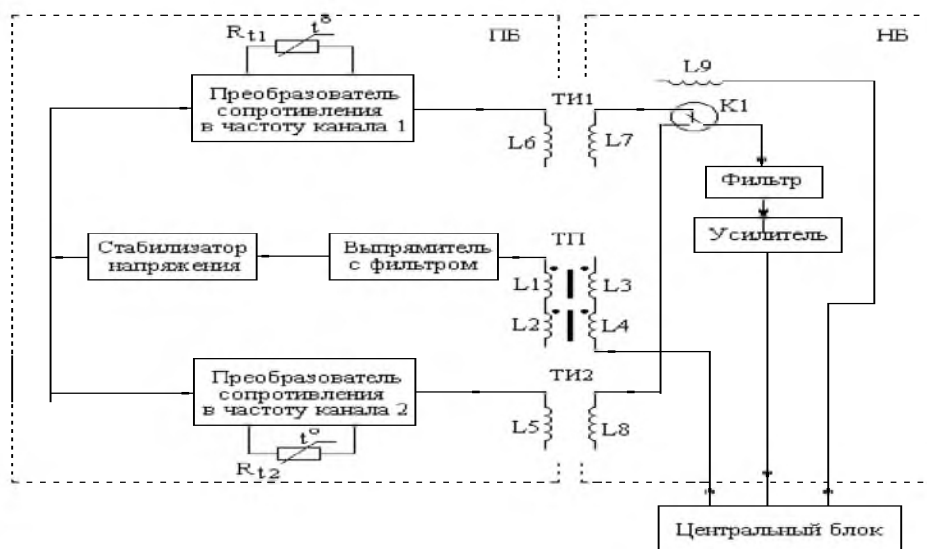


Рисунок 4 – Структурная схема ПБ и НБ БУКТ-К

Средства контроля температуры подшипников фирмы Kongsberg

Практически идентичную по конструкции, по структуре и по параметрам систему контроля

температуры подшипников под маркой “GB10” несколько позже предложила фирма Kongsberg, Норвегия (рисунок 5). Она также состоит из трех основных частей – ПБ, НБ и центрального блока [10].

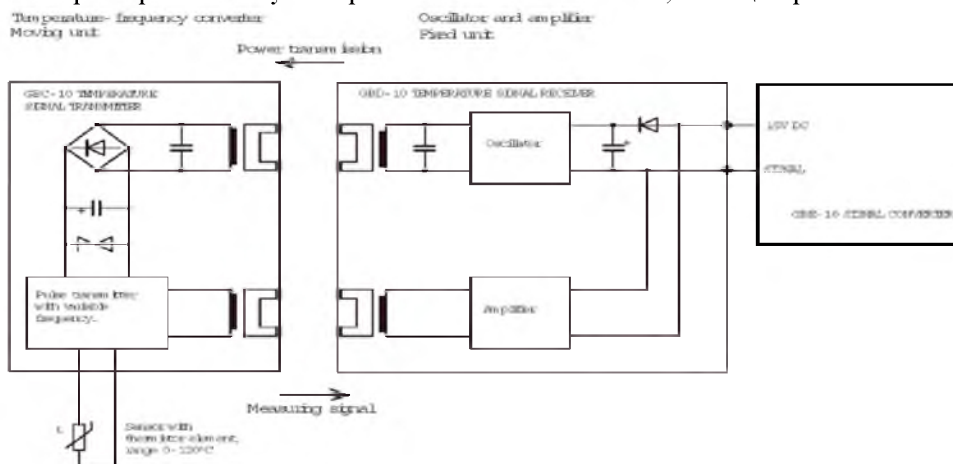


Рисунок 5 – Схема системы контроля температуры подшипников GB10

Подвижный блок включает в себя управляемый генератор, частота которого зависит от сопро-

тивления датчика температуры, в качестве которого использован термистор. Напряжение питания

поступает от НБ (*GBD-10*) к ПБ (*GBC-10*) через питающий трансформатор.

Переменное напряжение, снимаемое со вторичной обмотки, выпрямляется мостовым выпрямителем, фильтруется, стабилизируется и подается на питание генератора. Вырабатываемый генератором частотный сигнал через сигнальный трансформатор поступает в НБ, где усиливается и подается в центральный блок (*GBE-10*) для обработки. В центральном блоке частотный сигнал обрабатывается

и преобразуется в выходной токовый сигнал 4...20 мА, пропорциональный температуре.

Питание НБ осуществляется стабилизированным напряжением 15 В. В НБ имеется генератор, вырабатывающий переменное питающее напряжение для питания ПБ. Питание подается, а информационный сигнал снимается с ПБ при прохождении его мимо НБ с зазором 2...6 мм (рисунок 6).

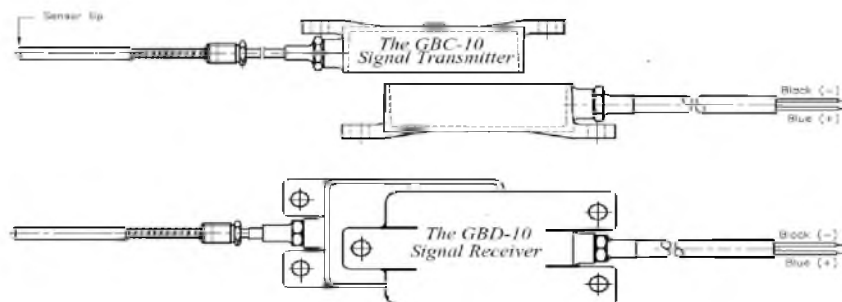


Рисунок 6 – Конструкция ПБ и НБ системы *GB-10*

Как утверждается, система обеспечивает погрешность измерения 2 градуса Цельсия в диапазоне температур 0...120 градусов Цельсия.

Следует отметить, что по сравнению с БУКТ-К, имеющего два независимых канала измерения, система *GB-10* имеет только один канал.

В начале 2000-х годов фирмой *Kongsberg* предложено новое техническое решение в области контроля температуры подшипников - система *SENTRY GB100* [11, 12].

Подвижный блок системы *GBW100* (в терминологии фирмы беспроводной температурный датчик) состоит из чувствительного элемента 1 (рисунок 7), который коаксиальным кабелем 2 соединен с антенной 3, выполненной в виде диска. Датчик вворачивается в сверление и фиксируется в корпусе подшипника. Неподвижный блок (стационарная антенна) *GBS100* крепится к остову двигателя и соединяется кабелем с блоком обработки сигнала *GBP100* (рисунок 8).

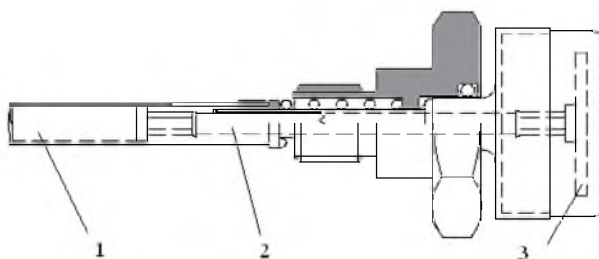


Рисунок 7 – Подвижный блок (датчик) системы *SENTRY*

Принцип действия основан на использовании прямого и обратного пьезоэффекта, в также в использовании поверхностной акустической волны чувствительного к температуре пьезоэлемента [2].

Блок обработки сигнала вырабатывает радиочастотный импульс, посылаемый в стационарную антенну, расположенную в картере дизеля (рисунок 8). Когда датчик приближается к стационарной антенне менее чем на 50 мм, этот им-

пульс воспринимается антенной датчика (рисунок 9) и в виде электрического напряжения прикладывается к транзьюсеру. В данном случае транзьюсер – это система электродов, нанесенных на поверхность пьезокристалла. Это вызывает механическое сжатие поверхности пьезокристалла (проявляется обратный пьезоэффект). Вследствие этого образуется поверхностная волна механической деформации, распространяющаяся вдоль кристалла пьезоэлектрика. Дойдя до первого рефлектора, эта волна деформации от

него частично отражается и возвращается к трансдюсеру. В нем она превращается в разность потенциалов (проявляется прямой пьезоэффект), прикладываемую к антенне в виде ответного им-

пульса, излучаемого в пространство. Он воспринимается стационарной антенной и поступает в блок обработки. При наличии нескольких рефлекторов (на рисунке их два) ответных импульсов соответственно будет несколько.

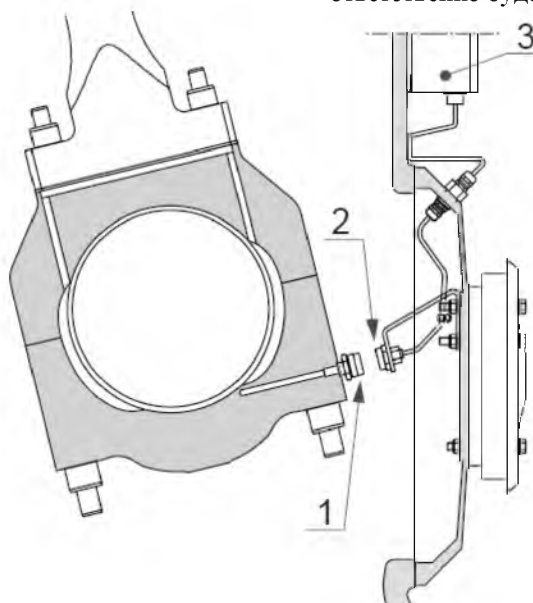


Рисунок 8 – Установка системы SENTRY GB100 на мотылевом подшипнике:
1 – датчик; 2- стационарная антенна; 3- блок обработки сигнала

Информация о температуре содержится в задержке времени между возбуждающим импульсом, поступившем от стационарной антенны, и принятым ею ответным импульсом. Из-за наличия температурного коэффициента линейного расширения, чем выше температура чувствительного элемента, тем сильнее он удлиняется, тем больше путь, проходимый поверхностной волной к рефлектору и обратно, тем больше задержка времени, которая и выражает эту температуру.

Система SENTRY GB100 обеспечивает измерение температуры до 160°C при погрешности +/- 2°C и максимальном зазоре между блоками до 50 мм. Диаметр щупа датчика 5...7 мм, а его максимальная температура 200 °C. К достоинствам этой системы следует отнести отсутствие в необходимости подачи питания к датчику, отсутствие износа датчика, его старения и необходимости техобслуживания.



Рисунок 9 – Чувствительный элемент датчика системы SENTRY GB100

В начале 2000-х годов система SENTRY была испытана на различных типах судовых дизелей, с наработкой на некоторых из них от 3000 до 8000 часов. Они показали достаточно высокую

надежность системы и способность оперативно реагировать на изменение температуры подшипника. На нее получены одобрения ряда мировых классификационных сообществ, надзирающих за

постройкой судов. Утверждается, что при наличии такой системы и контроля обычным способом (с помощью *Pt100*) температуры рамового подшипника детектор масляного тумана может отсутствовать.

С середины 2000 годов система *SENTRY* по желанию заказчиков устанавливается на судовые дизели – типа *DF* фирмы *Wartsila*, *ME/МС* фирмы *Man&Diesel turbo* и др.

Многоканальный мониторинг подшипников

Существенно более высоким потенциалом в плане мониторинга подшипников (и других узлов дизеля) обладает разработанное одним из соавторов статьи многоканальное бесконтактное устройство ТЕРМОКОНТ [3], [5]. Оно выполнено по структуре, приведенной на рисунке 1, содержит ПБ, НБ и блок обработки (смотри рисунок 10).

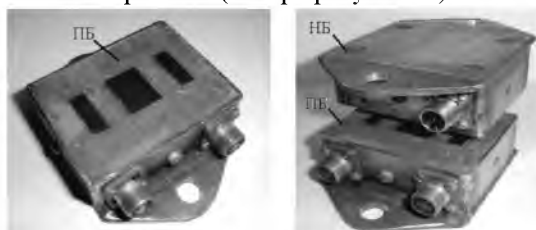


Рисунок 10 – ПБ и НБ системы мониторинга ТЕРМОКОНТ

В отличие от ранее рассмотренных, систем мониторинга ТЕРМОКОНТ является многока-

Таблица 1 – Технические данные опытного образца ТЕРМОКОНТа и потенциально достижимые значения его параметров

№ п/п	Параметр	Размерность	Значения, полученные в опытном образце	Потенциально достижимые значения (оценка)
1.	Тип датчика		термопара любого типа, обеспечивающая сигнал 0...25 мВ	термометр сопротивления
2.	Диапазон измеряемых температур при использовании термопар типа ТХА (<i>NiCr/NiAl</i>)	°С	0...625	до 1500 °С, при использовании термопар других типов
3.	Количество каналов измерения на один подвижный блок		6	1...10
4.	Рабочий зазор между блоками	мм	1...6	1...10
5.	Погрешность измерения $U_{вх}$, относенная к номинальному значению 625 °С, при зазоре между ПБ и НБ 6 мм, температуре блоков 20°С	%	0,16	0,15...0,3% для диапазона изменения температуры блоков 20...100°С и зазора 1...10 мм
6.	Габариты подвижного блока	мм	140x90x38	могут быть уменьшены в 1,5...2 раза
7.	Условия эксплуатации подвижного и неподвижного блоков		нефтезагрязнения и др. (условия картера дизеля)	нефтезагрязнения и др. (условия картера дизеля)
8.	Максимальная рабочая температура подвижного блока	°С	80	100...120
9.	Допустимые для ПБ линейные и ударные нагрузки с ускорением	g	15...25	до 100
10.	Максимальная скорость перемещения подвижного блока	м/с	6	30 и более

нальным устройством. В нем к одному ПБ подключено несколько (до 6 и более) датчиков температуры - термопар.

Многоканальность ПБ является принципиально необходимым условием для применения в качестве датчика термопары, как весьма малочувствительного преобразователя. Наличие дополнительного числа каналов позволяет выполнять тестовые замеры, по результатам которых возможно определение реальной характеристики информационного канала, с учетом временного дрейфа параметров элементов, напряжения питания, влияния температуры среды, температуры холодного спая и т.д. Это обеспечивает высокую точность измерения температуры.

В ТЕРМОКОНТЕ многоканальность обеспечена синхронизированным с движением объекта переключением входных сигналов от датчиков и источников тестовых замеров. При этом одно измерение выполняется за один проход ПБ мимо НБ. Для повышения помехоустойчивости, снижения энергопотребления, улучшения массогабаритных и метрологических характеристик, питание ПБ осуществляется в импульсном режиме, с разделением по времени интервалов подачи питания и съема информационного сигнала.

Более полное представление о параметрах ТЕРМОКОНТа дано в таблице 1.

Помимо более высокой точности и более широкого диапазона измеряемых температур, многоканальный вариант имеет еще одно существенное преимущество перед ранее рассмотренными системами мониторинга. Будучи установленным на шатуне, один ПБ позволяет контролировать все его подшипники, и мотылевый и крейцкопфный.

Заключение

Анализ состояния вопроса показывает, что в настоящее время имеются апробированные технические средства непрерывного эксплуатационного мониторинга подшипников судового дизеля. При небольшом объеме мониторинга, вследствие своей простоты в плане монтажа, может быть рекомендована система *SENTRY GB100*. При необходимости более обстоятельного, точного и высокотемпературного мониторинга подшипников следует использовать многоканальную систему мониторинга ТЕРМОКОНТ.

Литература

1. Конкс, Г.А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта: учеб. пособие / Г.А.Конкс, В.А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
2. Левшина, Е.С. Электрические измерения физических величин: измерительные преобразователи/Е.С. Левшина, П.В. Новицкий.– Л.: Энергоатомиздат, 1983.-320 с.
3. Самойленко А.Ю. Многоканальное устройство для измерения температуры поршня двигателя/А.Ю.Самойленко// Авт. Свидет. СССР № 1354926, МКИ-3 G01K13/06. Оpubл. 1987.- бюлл.№2.
4. Самойленко, А.Ю. Методика определения параметров ориентации блоков передачи информации в системах контроля температуры подвижных деталей судовых дизелей/А.Ю.Самойленко //Транспортное дело России. – 2003.– Спецвыпуск.- С.25-27.
5. Самойленко, А.Ю. Перспективные средства контроля температуры деталей движения судовых дизелей /А.Ю.Самойленко// Изв. Вузов. Сев.-Кавк. Регион. Техн. Науки. -2003. Спецвыпуск.- С.87-91.
6. Самойленко, А.Ю. Устройство для измерения температуры подвижного объекта/А.Ю.Самойленко, В.А.Шипкин//Авт. Свидет. СССР № 998875, МКИ-3 G01K13/04. Оpubл. 23.02.83.- бюлл. № 7.
7. Самойленко, А.Ю. Система автоматического эксплуатационного контроля температуры поршней судовых дизелей/А.Ю. Самойленко, Н.Б.Исаков, Д.К. Пулиезо// В кн.: Технические средства и системы автоматического управления судовыми энергетическими установками. – М.: В/О «Мортехинформреклама».- 1986. – С.31–37.
8. Самойленко, А.Ю., Полковников А.К. Температурный контроль крейцкопфных подшипников судовых МОД / А.Ю. Самойленко, Полковников А.К.// «Наука Кубани». – 1997. – № 1. – С. 37 – 40.
9. Service Experience of MAN B&W Low Speed Diesel Engines. 2010. MAN Diesel & Turbo Teglholmsgade 41.2450 Copenhagen SV, Denmark, www.mandieselturbo.com
10. Temperature monitoring system GB-10. KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway. www.kongsberg.com
11. Temperature monitoring system SENTRY GB-100. KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway. www.kongsberg.com
12. Wireless temperature monitoring for bearings in diesel engines. KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway. www.kongsberg.com

References

1. Konks, G.A. Mirovoe sudovoe dizelestroenie. Konceptii konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta: ucheb. posobie / G.A.Konks, V.A. Lashko. – M.: Mashinostroenie, 2005. – 512 s.
2. Levshina, E.S. Elektricheskie izmereniya fizicheskikh velichin: izmeritel'nye preobrazovately/E.S.Levshina, P.V.Novickij.-L.:Energoatomizdat,1983.-320 s.
3. Samojlenko,A.YU. Mnogokanal'noe ustrojstvo dlya izmereniya temperatury porshnya dvigatelya/A.YU.Samojlenko// Avt. Svidet. SSSR № 1354926, MKI-3 G01K13/06. Opubl. 1987.- byull.№2.
4. Samojlenko, A.YU. Metodika opredeleniya parametrov orientacii blokov peredachi informacii v sistemah kontrolya temperatury podviznykh detalej sudovykh dizelej/A.YU.Samojlenko //Transportnoe delo Rossii. – 2003.- Specvypusk.- S.25-27.
5. Samojlenko, A.YU. Perspektivnye sredstva kontrolya temperatury detalej dvizheniya sudovykh dizelej /A.YU.Samojlenko// Izv. Vuzov. Sev.-Kavk. Region. Tekhn. Nauki. -2003. Specvypusk.- S.87-91.
6. Samojlenko, A.YU. Ustrojstvo dlya izmereniya temperatury podvizhnogo ob"ekta/A.YU.Samojlenko, V.A.SHishkin//Avt. Svidet. SSSR № 998875, MKI-3 G01K13/04. Opubl. 23.02.83.- byull. № 7.
7. Samojlenko, A.YU. Sistema avtomaticheskogo ekspluatacionnogo kontrolya temperatury porshnej sudo-vyh dizelej/A.YU. Samojlenko, N.B.Isakov, D.K. Puliezo// V kn.: Tekhnicheskie sredstva i sistemy av-tomaticheskogo upravleniya sudovymi energeticheskimi ustanovkami. – M.: V/O «Mortekhinformreклаma».- 1986. – S.31–37.
8. Samojlenko, A.YU., Polkovnikov A.K. Temperaturnyj kontrol' krejckopfnih podshipnikov sudovykh MOD / A.YU. Samojlenko, Polkovnikov A.K.// «Nauka Kubani». – 1997. – № 1. – S. 37 – 40.

9. Service Experience of MAN B&W Low Speed Diesel Engines. 2010. MAN Diesel & Turbo Teglholsmsgade 41.2450 Copenhagen SV, Denmark, www.mandieselturbo.com
10. Temperature monitoring system GB-10. KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway. www.kongsberg.com
11. Temperature monitoring system SENTRY GB-100. KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway. www.kongsberg.com
12. Wireless temperature monitoring for bearings in diesel engines. KONGSBERG MARITIME AS NO-7005 Trondheim, Norway. www.kongsberg.com

УДК 621.22-253

DOI: 10.34046/aumsuomt93/14

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОТЕРЬ, ВЫЗВАННЫХ ПЕРЕТЕЧКАМИ В ПОЛОСТИ СЖАТИЯ СПИРАЛЬНОГО ХОЛОДИЛЬНОГО КОМПРЕССОРА

*Д.О. Владецкий, кандидат технических наук, доцент
А.Б. Гончар, начальник лаборатории
С.Н. Ефремов, кандидат технических наук, доцент
В.А. Тимофеев, старший преподаватель*

В данной статье рассмотрены результаты расчета и анализ потерь, вызванных перетечками при прохождении пара хладагента R22 в полости сжатия спирального компрессора холодильной машины, работающей в режиме кондиционирования. Предложен эксергетический метод анализа снижения работоспособности потока рабочей среды из-за потерь от перетечек пара.

Ключевые слова: перетечки, полость сжатия орбитальный угол, хладагент, потери, параметры, эксергия, работоспособность.

This article describes the results of calculation and analysis of losses caused by overflows during the passage of refrigerant R22 vapor in the compression cavity of the spiral compressor of the refrigeration machine operating in the air conditioning mode. The proposed method of analysis of the exergy decrement of flow of the working medium because of losses from leakages of steam.

Keywords: overflows, compression cavity, orbital angle, refrigerant, losses, parameters, exergy, operability.

В спиральном компрессоре используется принцип объемного сжатия. Подвижная спираль совершает относительно неподвижной плоскопараллельное движение с малым радиусом, равным эксцентриситету приводного вала. Это обеспечивает очень малый взаимный контакт движущихся частей компрессора. При этом динамика движения на периферии спиралей (область низкого давления) идентична динамике движения в центре (в конечной фазе цикла сжатия). Так как окружная скорость или скорость перемещения поверхностей спиралей относительно друг друга ниже, чем у поршневых компрессоров, при большей частоте вращения вала происходит за один и тот же промежуток времени «двойное сжатие». Высокая степень сжатия достигается за счет того, что используется около 95% рабочего объема.

В работах авторов [1, 2] рассмотрены термодинамические процессы, связанные с перетечками при сжатии пара R22 в спиральном холодильном компрессоре модели ZR94KC-TFD.

Данная работа ставит своей целью проанализировать объемные и энергетические потери потока хладагента при сжатии в рабочей полости, связанные с перетечками.

Основная задача – определить работоспособность, рассматриваемого компрессора, методом эксергетического анализа.

Объемные и энергетические потери от перетечек в процессе сжатия выявляются с использованием термических и калорических уравнений состояния рабочей среды.

$$\rho = \frac{m}{v}; T = \frac{(k-1)v}{mR}; P = \rho hT; h = RT \frac{k}{k-1} \text{ или}$$

$h = c_p T$, причем удельная теплоемкость меняется в зависимости от давления.

Течение пара хладагента в щелях, рассматриваемого спирального компрессора, считаем ламинарным, характерную для каждого зазора высоту δ считаем малой по сравнению с его глубиной b , а также считаем малым комплекс $\frac{\delta}{b Re}$.