

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.518

СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОСЕВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВАЛА В РАДИАЛЬНО- УПОРНОМ ПОДШИПНИКЕ ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НК-33

В.А. Белослудцев¹, С.Ю. Боровик², М.М. Кутейникова³, Ю.Н. Секисов⁴

Институт проблем управления сложными системами РАН –
обособленное подразделение ФГБУН
Самарского федерального исследовательского центра РАН
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

E-mail: m.kuteynikova@mail.ru

***Аннотация.** Рассматривается задача ранней диагностики состояния радиально-упорного подшипника турбонасосного агрегата жидкостного реактивного двигателя НК-33. Целью диагностики является выявление начальной стадии интенсивного износа подшипника, что позволяет спрогнозировать катастрофическое разрушение узла и предотвратить развитие аварийной ситуации силовой установки в целом. Существенным ограничением при разработке соответствующих методов диагностики являлся запрет на внесение в конструкцию изделия каких-либо изменений по числу и размерам используемых датчиков при обязательном сохранении имеющихся функций контроля частоты вращения ротора турбонасоса. Авторами было предложено решение, основанное на замене используемых в настоящее время в системах контроля параметров турбонасосного агрегата индукционных датчиков частоты вращения на одновитковые вихретоковые датчики с чувствительными элементами в виде отрезка проводника. Такой подход позволил осуществить мониторинг осевого смещения вала в радиально-упорном подшипнике, связанного с износом подшипника, и сохранить функцию измерения частоты вращения вала турбонасоса неизменной. В статье приводится краткое описание реализованного подхода к ранней диагностике состояния подшипникового узла турбонасосного агрегата НК-33 на основе измерения осевого смещения вала в подшипнике. В основе технических решений, реализующих указанный подход, лежат оригинальные одновитковые*

¹ Белослудцев Виктор Александрович, ведущий конструктор лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации.

² Боровик Сергей Юрьевич, ведущий научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации, доктор технических наук.

³ Кутейникова Марина Михайловна, старший научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации, кандидат технических наук.

⁴ Секисов Юрий Николаевич, главный научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации, доктор технических наук.

вихретоковые датчики особой конструкции со смещенными чувствительными элементами и нестандартные преобразователи их выходных сигналов в сочетании со стандартными средствами аналого-цифрового преобразования (внешними модулями АЦП L-Card E14-440 российского производства) и ПЭВМ, обеспечивающей управление сбором, преобразованиями и отображением информации. Предлагается структурно-функциональная схема такой системы контроля и рассматривается обобщенный алгоритм ее функционирования.

Ключевые слова: жидкостный реактивный двигатель, турбонасосный агрегат, радиально-упорный подшипник, износ, осевые перемещения вала, предотвращение аварийной ситуации, одновитковый вихретоковый датчик, кластерные методы, система контроля, структурно-функциональная схема, алгоритм функционирования

Введение

Жидкостные реактивные двигатели (ЖРД) являются основным типом силовых установок, используемых в ракетно-космической технике. Очевидно, что высокая стоимость, а зачастую и уникальность запусков предъявляют особые требования к надежности как самих ракетоносителей, так и их двигательных установок.

По признанию многих специалистов в области ракетостроения, одним из самых надежных ракетных двигателей является ЖРД НК-33, разработанный еще в середине 60-х годов в конструкторском бюро академика Н.Д. Кузнецова [1, 2]. Это в том числе стало одной из причин высокого интереса представителей зарубежных аэрокосмических фирм к данному виду силовых установок. Так, два модифицированных НК-33 в американской версии AJ-26 использовались в 2013–2014 гг. в качестве двигателей первой ступени на ракетах-носителях «Антарес» [3]. Параллельно с зарубежными программами рассматриваются и отечественные проекты новых ракет-носителей «Ямал», «Аврора», «Союз-2-3», также предусматривающих использование модифицированных двигателей НК-33 [2].

Следует отметить, что большинство современных ЖРД, включая НК-33, работают на двухкомпонентном топливе. Поэтому одним из основных узлов двигателя является турбонасосный агрегат (ТНА), который обеспечивает подачу и смешение жидких компонентов ракетного топлива. Очевидно, что разрушения элементов ТНА в процессе эксплуатации силовой установки могут привести к катастрофическим последствиям как для нее самой, так и для ракетоносителя в целом.

В свою очередь, критически важным узлом ТНА, испытывающим значительные механические нагрузки, является радиально-упорный подшипник (РУП), который обеспечивает взаимное положение ротора турбонасоса и статора, воспринимает осевое давление ротора и не допускает его перемещений в направлении собственной оси. Значительные осевые нагрузки, действующие на ротор ТНА в процессе функционирования силовой установки, могут привести к разрушению внутренней поверхности упорного подшипника и выходу его из строя даже несмотря на применение специальных разгрузочных устройств и приспособлений. Об этом, в частности, как раз и свидетельствуют результаты расследования НАСА аварии ракеты Antares 28.10.2014 [4]. Поэтому решение задачи обеспечения надежного функционирования ТНА, а также раннего обнаружения разрушения элементов его конструкции, способных привести к взрыву двигателя, носит первостепенный характер.

По мере истирания внутренней поверхности РУП происходит смещение вала ротора в направлении действия осевой силы, и контроль такого смещения на протяжении всего цикла работы ЖРД является эффективным способом оценки состояния ТНА. Важно также отметить, что НК-33 и все его элементы имеют законченное исполнение. В этой связи одним из принципиальных требований разработчиков силовой установки к системе контроля состояния РУП является недопустимость внесения каких-либо изменений в конструкцию ТНА при полном сохранении уже имеющейся функции определения частоты вращения ротора турбонасоса.

Среди всей совокупности существующих на сегодняшний день преобразователей перемещений, которые так или иначе могут использоваться для решения указанной задачи, вихретоковые датчики представляются наиболее эффективными и востребованными [5, 6]. Причиной тому являются неоспоримые преимущества таких преобразователей, связанные прежде всего с их невосприимчивостью к наличию загрязнений внешней среды, способностью работать в условиях воздействия вибраций, агрессивных жидкостей, электромагнитных полей и т. п.

В работе [7] предлагается метод измерения осевых перемещений вала в РУП ТНА, обеспечивающий контроль износа подшипника и полностью удовлетворяющий предъявляемым требованиям и ограничениям. В основе метода лежат одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) особой конструкции со смещенными в торцевой части датчика чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника. Подобного рода первичные преобразователи в различных модификациях применяются на протяжении более чем тридцати лет в задачах экспериментальных исследований проточной части газотурбинных двигателей [6, 8–11], где были подтверждены метрологические характеристики и высокая надежность датчиков в экстремальных условиях их функционирования, свойственных ракетно-космической технике. В свою очередь, в работе [12] приводится описание метода измерения частоты вращения и ускорения ротора турбокомпрессора на основе аналогичных ОВТД, что обеспечивает выполнение еще одного требования, предъявляемого к системе контроля состояния РУП со стороны разработчиков двигательной установки. Поэтому вполне очевидным является использование ОВТД для решения рассматриваемой задачи ранней диагностики износа РУП ТНА двигателя НК-33.

В статье на основе структурно-функциональной схемы и обобщенного алгоритма функционирования предлагаются принципы построения систем контроля осевых смещений вала в РУП, обеспечивающих раннее обнаружение износа подшипникового узла. Основу аппаратной части систем составляют уже упомянутые оригинальные ОВТД особой конструкции и преобразователи их выходных сигналов в сочетании со стандартными средствами аналого-цифрового преобразования (предполагается использовать внешний модуль АЦП L-Card E14-440 российского производства [13]) и ПЭВМ, обеспечивающая управление сбором, преобразованиями и отображением информации. При этом рассмотрению структуры и алгоритма предшествует краткое описание реализуемого подхода, которое необходимо для понимания особенностей функционирования системы.

Контроль осевого смещения и частоты вращения ротора ТНА в РУП с помощью ОВТД

В существующих конструкциях ТНА НК-33 предусмотрен блок измерения частоты (БИЧ) вращения вала, который содержит два штатных датчика частоты вращения (ДЧВ) типа ИС-445 (основной и дублирующий) и измерительный диск с двумя диаметрально противоположными выступами. Для решения рассматриваемой в статье задачи контроля осевого смещения вала в РУП ТНА с одновременным сохранением функции измерения частоты вращения вала в работе [7] было предложено модифицировать БИЧ путем замены штатных ДЧВ на специально разработанные ОВТД, идентичные ИС-445 по габаритам и установочным размерам. При этом в связи с особенностями функционирования ОВТД также потребовалась замена измерительного диска, изготовленного из магнитной стали, на аналогичный диск из немагнитного материала, который обладает теми же прочностными и массогабаритными характеристиками, что и исходный. Указанные изменения в конструкции блока являются допустимыми с точки зрения разработчиков силовой установки.

Два ОВТД, установленные на корпусе ТНА, образуют распределенный кластер датчиков и позволяют реализовать один из методов измерения радиальных и осевых перемещений элементов силовых конструкций, описания которых можно найти в работах [9, 10, 14, 15]. В то же время размещение ОВТД в тех же установочных отверстиях, что и штатные ДЧВ, не позволяет расположить датчики на корпусе агрегата с взаимным смещением относительно центральной плоскости вращения измерительного диска на расстояние, равное половине ожидаемого осевого смещения вала, как того требует реализация соответствующего метода измерения. Поэтому потребовалась модификация конструкции ОВТД. В частности, новые ОВТД были выполнены с ассиметричным расположением ЧЭ в торцевой части датчика, при этом геометрический центр (г. ц.) ЧЭ был смещен относительно центральной оси датчика на расстояние, равное $\frac{1}{2}$ от ожидаемого диапазона осевого перемещения вала в РУП [7]. Кроме того, в отличие от «классического» подхода, при котором информационным параметром является радиальный зазор, а осевые смещения вала относятся к мешающим факторам, в рассматриваемом случае, наоборот, осевое смещение – это информационный параметр, а изменения радиального зазора между ЧЭ датчиков и выступом измерительного диска – мешающий фактор.

На рис. 1 схематически представлено положение ЧЭ ОВТД₁ и ОВТД₂ относительно одного из выступов измерительного диска. ЧЭ ориентированы параллельно длинной стороне торцевой части выступа. При этом г. ц. ЧЭ ОВТД₁ смещен относительно г. ц. установочного отверстия на величину, равную $-\frac{1}{2}\Delta x$, а г. ц. ЧЭ ОВТД₂ – на величину $+\frac{1}{2}\Delta x$, где Δx – диапазон возможных осевых смещений вала в РУП.

Если осевое смещение вала отсутствует, то выступ измерительного диска перекрывает ЧЭ обоих ОВТД в равной пропорции. При неизменном РЗ прохождение выступом зон чувствительности ОВТД₁ и ОВТД₂ приведет к одинаковым изменениям выходных параметров (эквивалентных индуктивностей) датчиков. Появление осевого смещения приведет к тому, что выступ измерительного диска окажется ближе к ЧЭ одного из ОВТД и площадь

перекрытия выступом диска этого ЧЭ увеличится, а второго, соответственно, пропорционально уменьшится. При прочих равных условиях изменения выходных параметров ОВТД₁ и ОВТД₂ при прохождении выступом диска зон их чувствительности также будут разными – эквивалентная индуктивность датчика, ЧЭ которого в большей степени будет перекрыт торцевой частью выступа диска, уменьшится, а второго, соответственно, увеличится. Совокупная обработка сигналов, соответствующих указанным изменениям эквивалентных индуктивностей ОВТД₁ и ОВТД₂, позволяет определить искомые осевые смещения вала в РУП.

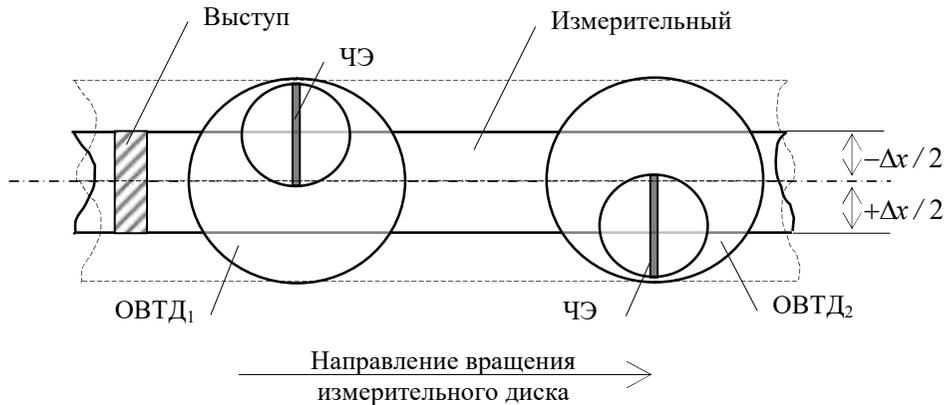


Рис. 1. Положение ЧЭ ОВТД₁ и ОВТД₂ относительно измерительного диска

В свою очередь, для определения частоты вращения измерительного диска и формирования соответствующих сигналов (основного и дублирующего) для штатной системы мониторинга ТНА вычисляются временные интервалы между экстремальными значениями соседних сигналов, соответствующих прохождению выступами измерительного диска под ЧЭ каждого ОВТД. Способ определения скоростей и ускорений диска с дискретной наружной поверхностью (лопаточное колесо, шестерня, диск с выступами и т. д.) достаточно подробно рассмотрен в [12] и здесь не приводится.

Структурно-функциональная схема системы

Обобщенная структурно-функциональная схема системы контроля осевых перемещений вала в РУП ТНА двигателя НК-33, реализующей приведенный ранее подход, представлена на рис. 2.

Два идентичных по своим параметрам ОВТД₁ и ОВТД₂ образуют распределенный кластер, размещаемый в тех же посадочных местах, что и соответствующие ДЧВ в штатном БИЧ. Через тоководы и согласующие трансформаторы ЧЭ датчиков подключаются каждый к своему преобразователю сигналов, основу которых составляют индивидуальные измерительные цепи (ИЦ), построенные по дифференциальной схеме и реализующие метод первой производной [8]. Метод первой производной обеспечивает фиксацию производной тока в момент подачи импульса питания на ИЦ с датчиком, когда изменения эквивалентной индуктивности ОВТД $L_3(t) = L_0 - \Delta L(t)$, связанные с прохождением торцевой части выступа измерительного диска под ЧЭ датчика, имеют наибольшую величину.

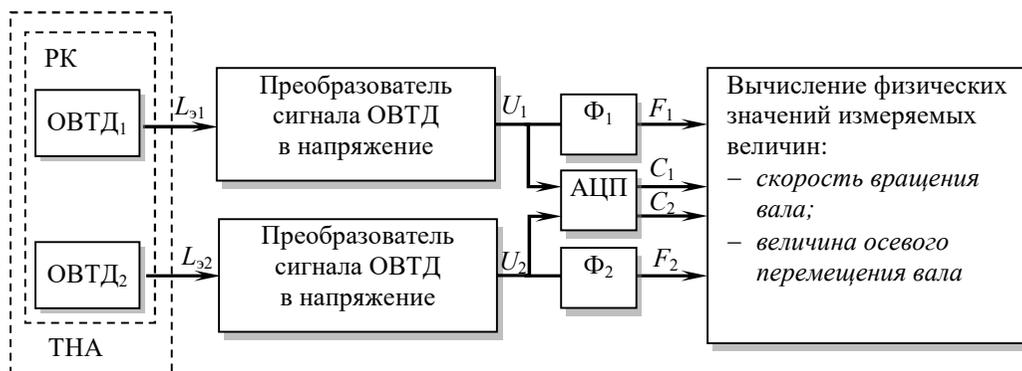


Рис. 2. Обобщенная структурно-функциональная схема системы контроля осевых перемещений и определения скорости вращения вала в РУП

Дифференциальное включение ОВТД позволяет выделить в аналоговом выходном сигнале ИЦ только информативную часть изменений эквивалентной индуктивности $\Delta L(t)$, исключив неинформативную составляющую L_0 . Традиционно такие ИЦ строятся на основе моста Блумлейна [8] или неравновесного моста с операционным усилителем в режиме дифференцирования [9, 10]. При этом в одно плечо мостовой схемы включается рабочий ОВТД, а во второе – либо аналогичный ОВТД, выполняющий компенсационные функции, либо его имитатор в виде катушки индуктивности, величина которой равна собственной индуктивности рабочего ОВТД L_0 [11, 16]. Учитывая невозможность размещения дополнительных датчиков на корпусе ТНА, в рассматриваемом случае применим только вариант дифференциальной ИЦ с имитатором ОВТД (на рис. 2 имитаторы ОВТД не показаны).

Помимо ИЦ каждый преобразователь содержит усилитель-нормализатор, обеспечивающий согласование напряжений U_1 и U_2 на выходе ИЦ с последующими устройствами аналого-цифрового преобразования и обработки сигналов. Нормализованные напряжения U_1 и U_2 с выходов преобразователей сигналов ОВТД подаются на многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В последнем случае предполагается использовать внешний модуль E14-440 фирмы L-Card [13], который содержит АЦП 14 бит/400 кГц для подключения до 16 дифференциальных каналов и имеет программно управляемую настройку параметров сбора данных. Кроме того, в модуле имеется собственный цифровой сигнальный процессор ADSP-2185M [17], что позволяет реализовывать специализированные алгоритмы обработки сигналов в реальном времени на уровне программирования DSP. Связь модуля с другими устройствами осуществляется через стандартный USB-интерфейс версии 2.0. Это обеспечивает его легкую интеграцию с ПЭВМ с предустановленным специализированным ПО, реализующим заявленные функции системы контроля. Впоследствии, при реализации бортового варианта системы, ПЭВМ может быть заменена на одноплатную ЭВМ или микропроцессорный модуль со встроенными АЦП. Параллельно с аналого-цифровым преобразованием напряжения U_1 и U_2 поступают на индивидуальные формирователи сигналов Φ_1 и Φ_2 , на выходе которых формируются короткие прямоугольные импульсы F_1 и F_2 ,

соответствующие моментам прохождения выступами измерительного диска под ЧЭ ОВТД₁ и ЧЭ ОВТД₂ соответственно.

В блоке вычисления физических значений измеряемых величин (может быть реализован в ПЭВМ или в микропроцессорном блоке для бортового варианта системы) осуществляется обработка цифровых кодов C_1 , C_2 , соответствующих изменениям индуктивностей ЧЭ ОВТД₁ и ОВТД₂ при прохождении выступом измерительного диска зон чувствительности датчиков. Здесь же осуществляется вычисление и анализ осевого смещения вала на каждом обороте измерительного диска, что позволяет непрерывно следить за износом РУП и по заданным уставкам формировать соответствующие сигналы в блок мониторинга ТНА о состоянии подшипникового узла. При этом осевые смещения вычисляются на основе предварительно снятых градуировочных характеристик (ГХ) измерительных каналов, представляющих собой зависимости цифровых кодов, соответствующих эквивалентным индуктивностям ОВТД (напряжениям на выходе соответствующих), от радиального зазора между выступом и ЧЭ, а также осевого смещения вала (координат x , y):

$$\begin{cases} C_1 = f_1(x, y); \\ C_2 = f_2(x, y). \end{cases} \quad (1)$$

Решению системы уравнений (1) предшествует предварительная аппроксимация ГХ полиномиальными функциями двух переменных или кусочно-линейная (кусочно-полиномиальная) интерполяция. Обычно искомые координаты вычисляются с помощью алгоритма на основе метода Ньютона [9]. Для немонотонных ГХ могут быть использованы также и специализированные алгоритмы вычисления координат по аналогии с [18].

В свою очередь, измеряя интервалы времени между двумя соседними импульсами $F_{1,i-1}$ и $F_{1,i}$ ($F_{2,i-1}$ и $F_{2,i}$) (блок вычисления физических значений измеряемых величин), можно определить частоту вращения вала ТНА. Указанная операция также может быть реализована в ПЭВМ или, как это было предложено в [12], на уровне отдельного микропроцессорного модуля.

Обобщенный алгоритм функционирования системы

Программная реализация рассматриваемого подхода может быть осуществлена на основе комбинации алгоритмов определения радиальных и осевых смещений торцов лопаток с помощью распределенного кластера ОВТД [9] и вычисления угловых скоростей и ускорений по торцам рабочих лопаток компрессора (турбины) ГТД [12]. Из представленной выше (рис. 2) структурно-функциональной схемы видно, что для получения искомой информации необходимо выполнение следующих операций:

1. Нормализация и преобразование в цифровой код сигналов ОВТД₁ и ОВТД₂.
2. Предварительная обработка полученных значений кодов, которая обычно включает термокоррекцию и выделение экстремальных значений кодов в измерительных каналах системы.
3. Расчет физического значения осевого перемещения вала в РУП и определение частоты его вращения.
4. Сопоставление фактического значения осевых смещений с максимально допустимым и формирование соответствующего сигнала в систему управления двигателем.

Следует отметить, что традиционно реализуемые в системах измерения многокоординатных смещений торцов лопаток и лопастей авиационных и наземных ГТД [9] алгоритмы сбора, преобразования и обработки измерительной информации, как правило, предполагают, что все операции выполняются последовательно в старт-стопном режиме без серьезных ограничений во времени и повышенных требований к быстродействию применяемых технических средств системы. Рассматриваемый же случай предполагает принципиально непрерывный режим опроса ОВТД и вычисления искомых диагностических параметров, а потому существенно возрастают требования к вычислительным ресурсам и динамическим характеристикам системы. Для улучшения динамических характеристик алгоритмов в работе [19] предлагается использовать так называемое «квазипараллельное» выполнение нескольких операций в темпе опроса измерительных преобразователей. Данный подход применим и в рассматриваемом случае. При этом вычислительные операции должны осуществляться во временном промежутке, равном примерно половине периода вращения измерительного диска между моментами появления выступов в зоне чувствительности обоих ОВТД.

Блок-схема алгоритма общего функционирования системы контроля осевых смещений и определения скорости вращения вала в РУП представлена на рис. 3. Запуск процедур сбора и обработки измерительной информации о диагностических параметрах подшипникового узла начинается после ввода исходных данных (конфигурация используемых технических средств, ГХ измерительных каналов системы, уставки по допустимым осевым смещениям) и инициализации используемых АЦП (блоки 2–3). Цикл опроса ОВТД и вычислений физических значений осевых смещений осуществляется в основном теле алгоритма (блоки 4–14), который реализован в виде трех независимых потоков выполнения, два из которых (блоки 4–7 и 8–11) идентичны по своему программному наполнению и обеспечивают управление сбором, преобразованиями и вычислениями в каждом из измерительных каналов системы. Третий поток (блоки 12–14) осуществляет интеграцию результатов преобразования, вычисление физических значений осевых смещений вала (блок 12), сопоставление полученного результата с заданными установками (блок 13) и формирование соответствующего сигнала оповещения системе автоматического управления двигателем (блок 14).

При реализации алгоритма на верхнем уровне в ПЭВМ управление процедурами опроса измерительных каналов с ОВТД₁ и ОВТД₂ (блоки 4, 8) осуществляется программными средствами, реализованными в фирменном ПО L-Card, которое обеспечивает формирование во внутренней памяти ПЭВМ буфера FIFO, содержащего последовательности кодов для первого и второго измерительных каналов системы. При появлении очередного цифрового отсчета кода ($C_{1,i}$ или $C_{2,i}$) происходит его сопоставление с допустимым уровнем шумовой составляющей (блоки 5, 9), и если величина кода превышает этот уровень, запускается процедура поиска и фиксации экстремума кода и момента времени, соответствующего его появлению (блоки 6, 10). При этом может использоваться процедура амплитудного детектирования экстремумов кодов, аналогичная той, описание которой приведено в [20]. По интервалам времени между обнаружениями текущего и предыдущего экстремумов (между сформированными импульсами F_{i-1} , F_i) вычисляются значения частоты вращения вала отдельно в каждом канале системы (блоки 7, 11). Останов работы алгоритма

(блок 15) осуществляется, соответственно, либо по команде оператора, либо по сигналу от системы аварийного отключения двигателя.

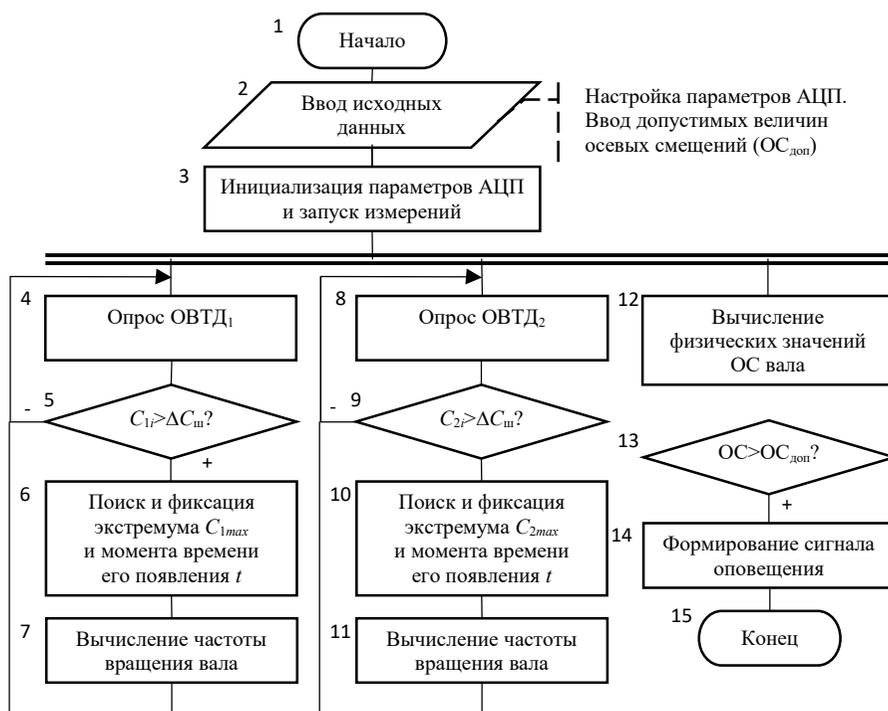


Рис. 3. Блок-схема алгоритма общего функционирования системы контроля осевых перемещений и определения скорости вращения вала в РУП

Реализация алгоритма на микропроцессорном уровне не отличается от рассмотренного выше варианта по последовательности операций, однако потребует разработки соответствующего внутреннего ПО микропроцессорного блока системы контроля.

Заключение

В статье рассмотрен подход к созданию системы контроля осевых перемещений вала в РУП ТНА ЖРД НК-33 на основе применения ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника, направленный на раннюю диагностику износа подшипникового узла и, как следствие, на повышение надежности и безопасности эксплуатации силовой установки в целом. Особенностью подхода является замена используемых в существующем БИЧ ДЧВ на оригинальные ОВТД, идентичные с последними по размерам и способам установки на корпусе ТНА. При этом функция определения частоты вращения вала ТНА с учетом основного и резервного каналов измерения осталась неизменной.

Предложены принципы построения систем контроля износа РУП на уровне структурно-функциональной схемы и обобщенного алгоритма функционирования системы контроля. В структурно-функциональной схеме два ОВТД, установленные взамен ранее используемых ДЧВ, образуют т.н. распределенный кластер датчиков, который позволяет реализовать в системе метод измерения радиальных и осевых перемещений элементов конструкций

силовых установок по аналогии с тем, как это было сделано применительно к газотурбинным двигателям. Дополнение традиционной схемы, реализующей кластерный метод измерения радиальных и осевых смещений, формирователями прямоугольных импульсов при прохождении выступами измерительного диска под ЧЭ каждого ОВТД с учетом дальнейшего вычисления временного интервала между соседними импульсами относительно одного и того же ЧЭ, позволило выполнить условие сохранения функции измерения частоты вращения вала ТНА, которая в настоящее время используется в системе управления ЖРД.

Предложен обобщенный алгоритм функционирования системы, который в отличие от существующих подходов, предполагающих старт-стопный режим запуска процессов измерения, ориентирован на непрерывный сбор данных о величине осевого смещения вала в РУП и частоте вращения ротора ТНА. При этом основной цикл опроса измерительных каналов с ОВТД и вычислений физических значений искомых диагностических параметров реализован в виде трех независимых потоков выполнения, два из которых идентичны по своему программному наполнению и обеспечивают управление сбором, преобразованиями и вычислениями в каждом из измерительных каналов системы, а третий поток осуществляет интеграцию результатов, сопоставление его с заданными уставками и формирование соответствующего сигнала оповещения оператору или (в перспективе) системе автоматического управления двигателем. В общем случае алгоритм функционирования системы инвариантен к вычислительным средствам, используемым для его реализации, и может быть воплощен как в ПЭВМ, так и в отдельных микропроцессорных модулях при переходе к бортовому варианту системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тресвятский С.Н., Федорченко Д.Г., Данильченко В.П. Жидкостный ракетный двигатель НК-33-1 многократного применения для современных ракет-носителей легкого, среднего и тяжелого классов // Академические чтения по космонавтике: Тр. XXX конф. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. С. 337–341.
2. Тресвятский С.Н., Федорченко Д.Г., Данильченко В.П. Космические двигатели СНТК имени Н.Д. Кузнецова // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2006. № 2–1. С. 16–22.
3. Antares Launch Vehicle. Antares Overview. <https://web.archive.org/web/20130922012950/http://www.orbital.com/NewsInfo/MissionUpdates/Orb-D1/files/9%20Antares%20Overview.pdf> (accessed June 23, 2022).
4. NASA Independent Review Team Orb-3 Accident Investigation Report. Executive Summary. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf (accessed June 23, 2022).
5. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля / Под ред. В.Е. Шатерникова. М.: Спектр, 2010. 256 с.
6. Borovik S., Sekisov Y. Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines // Sensors. 2020. No. 20. P. 2107.
7. Belosludtsev V., Borovik S., Danilchenko V., Sekisov Y. Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors 2021. No. 21. P. 3463.
8. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. 188 с.
9. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / под общ. ред. О.П. Скобелева. М.: Машиностроение, 2011. 298 с.
10. Кластерные методы и средства измерения радиальных зазоров в проточной части турбины / под общ. ред. О.П. Скобелева. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 224 с.

11. Методы и средства измерения и обработки информации о радиальных зазорах в проточной части ГТД с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик / под общ. ред. *О.П. Скобелева*. Самара: Новая техника, 2021. 142 с.
12. *Белопухов В.Н., Боровик С.Ю.* Система измерения ускорений лопаточного колеса компрессора и турбины с использованием одновиткового вихретокового датчика и микроконтроллера // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XIV междунар. конф. Самара: СамНЦ РАН, 2012. С. 607–611.
13. *Гарманов А.В.* Преобразователи напряжения измерительные L-CardE20-10, E20-10-1, E20-10-D, E20-10-D-1, E20-10-D-1, E20-10-D-1-I. Руководство пользователя. М.: ЗАО «Л-Кард», 2021. 79 с.
14. *Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Тулупова В.В.* Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Ч. 1. Обоснование предлагаемых методов и их описание // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 16–19.
15. *Беленький Л.Б., Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Тулупова В.В.* Методы измерения смещений торцов лопаток в компрессорах и турбинах на основе распределенных кластеров датчиков. Ч. 2. Реализуемость методов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 5. С. 21–30.
16. *Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Подинов П.Е., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.* Измерение радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на одновитковый вихретоковый датчик // Датчики и системы. 2019. № 4. С. 39–46.
17. DSP Microcomputer ADSP-2185M. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADSP-2185M.pdf> (accessed June 23, 2022).
18. *Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н.* Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII междунар. конф. Самара: СамНЦ РАН, 2010. С. 323–327.
19. *Боровик С.Ю., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., Тулупова В.В.* Способ квази-параллельных измерений и вычислений координатных составляющих многомерных перемещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. V междунар. конф. Самара: СамНЦ РАН, 2003. С. 506–511.
20. А.с. 1550608 SU, МКИ H03K5/153. Устройство для фиксации момента прохождения задним фронтом импульса заданного уровня / *Белопухов В.Н., Малов А.Н., Подвигин В.Н.*; опубл. 15.03.90. Бюл. № 10.

Статья поступила в редакцию 25 марта 2022 г.

STRUCTURE AND OPERATING ALGORITHMS OF THE SYSTEM FOR MONITORING OF THE SHAFT'S AXIAL DISPLACEMENT IN COMBINED JOURNAL-AND-THRUST BEARING OF THE TURBO-PUMP UNIT OF LIQUID-PROPELLANT ROCKET ENGINE NK-33

V.A. Belosludtsev¹, S.Y. Borovik², M.M. Kuteynikova³, Y.N. Sekisov⁴

Samara Federal Research Scientific Center RAS
Institute for the Control of Complex Systems RAS
61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russian Federation

E-mail: m.kuteynikova@mail.ru

Abstract. The problem of early wear diagnostics of the combined journal-and-thrust bearing of the turbo-pump unit of the liquid-propellant rocket engine NK-33 is considered. The main purpose of the diagnostics is to identify the initial stage of the bearing's intensive wear. This allows to detect timely the catastrophic destruction of the unit and to prevent the development of emergency destruction of the power plant in general. The significant limitation of the appropriate diagnostic methods was the strict requirements of the inadmissibility of any changes on the number and dimensions of the sensors used in the product body while the existing functions of the turbopump rotor rotation speed monitoring should remain unchanged. The authors proposed a solution based on the replacement of the inductive RPM sensors that are currently used in the turbopump unit parameter monitoring systems with single-coil eddy current sensors with sensitive elements in the form of a conductor segment. This approach made it possible to monitor the axial displacement of the shaft in the combined journal-and-thrust bearing associated with the wear of the assembly and to keep the function of the measuring of the turbopump shaft rotational speed unchanged. The article provides a brief description of the implemented approach to early diagnosis of the condition of the bearing assembly of the NK-33 turbopump unit based on the measurement of the axial displacement of the shaft in the bearing. The technical solutions that implement the approach are based on the use of original single-coil eddy current sensors of a special design with shifted sensing elements, the non-standard converters of their output signals in combination with standard analog-to-digital converters (external modules of the Russian-made L-Card E14-440 ADC) and a PC that provides the control of the data acquisition, processing and visualization. A structural and functional scheme of the control system and its generalized operation algorithm are proposed.

Keywords: *liquid-propellant jet engine, turbo-pump unit, journal-and-thrust bearing, wear, shaft's axial displacement, preventing of the emergency destruction, single-coil eddy current sensor, cluster methods, monitoring system, structural and functional scheme, operation algorithm*

REFERENCES

1. *Tresvyatskiy S.N., Fedorchenko D.G., Danilchenko V.P.* Liquid rocket reusable engine NK-33-1 for modern light, medium and heavy class launch vehicles // Proceedings of the XXX Academic Readings on Space Science, Moscow, Russia, 2006. P. 337–341. (In Russian).

¹ *Viktor A. Belosludtsev, Leading Designer.*

² *Sergey Y. Borovik (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Scientist.*

³ *Marina M. Kuteynikova (Ph.D. (Techn.)), Senior scientist.*

⁴ *Yuriy N. Sekisov (Dr. Sci. (Techn.)), Chief Scientist.*

2. *Tresvyatskiy S.N., Fedorchenko D.G., Danilchenko V.P.* Liquid propellant rocket engines designed by N.D. Kuznetsov Company // *Vestn. Samara Univ. Aerosp. Mech. Eng.* 2006. No. 2–1. P. 16–22. (In Russian).
3. Antares Launch Vehicle. Antares Overview. <https://web.archive.org/web/20130922012950/http://www.orbital.com/NewsInfo/MissionUpdates/Orb-D1/files/9%20Antares%20Overview.pdf> (accessed June 23, 2022).
4. NASA Independent Review Team Orb–3 Accident Investigation Report. Executive Summary. https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf (accessed June 23, 2022).
5. *Gerasimov V.G., Klyuev V.V., Shaternikov V.E.* Methods and Devices for Electromagnetic Control. Moscow: Spektr, 2010. 256 pp. (In Russian).
6. *Borovik S., Sekisov Y.* Single-Coil Eddy Current Sensors and Their Application for Monitoring the Dangerous States of Gas-Turbine Engines // *Sensors.* 2020. 20. P. 2107.
7. *Belosludtsev V., Borovik S., Danilchenko V., Sekisov Y.* Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors // *Sensors* 2021. 21. P. 3463.
8. Methods and Tools for Measuring Multidimensional Displacements of Structural Components of Power Plants / *Sekisov Y.N., Skobelev O.P., Eds.* Samara: Izd. SamNTs RAN, 2001, 188 pp. (In Russian).
9. Cluster Methods and Tools for Measuring Stator Deformations and Displacement Coordinates of Blade Tips and Blades in Gas Turbine Engines / *Skobelev O.P., Ed.*; Moscow: Izd. Mashinostroenie, 2011. 298 pp. (In Russian).
10. Cluster Methods and Tools for Measuring Radial Clearances in Turbine Flow Section / *Skobelev O.P., Ed.*, Moscow: Izd. Innovatsionnoe Mashinostroenie, 2018, 224 pp. (In Russian).
11. Methods and Tools for the Processing of the Information About Radial Clearances in GTE Flow Section with Self-Compensation of Temperature Effect on the Sensor / *Skobelev O.P., Ed.*, Samara: Izd. Novaya Technika, 2021, 142 pp. (In Russian).
12. *Belopukhov V.N., Borovik S.Y.* System for the measuring the angle accelerations of the blade wheel of a compressor or turbine on the basis of single-coil eddy-current sensor and microcontroller // *Proceedings of the XIV International Conference “Complex Systems: Control and Modelling Problems”*, Samara, Russia, 2012. P. 607–611. (In Russian).
13. *Garmanov A.V.* Voltage Measuring Converters L-CardE20-10, E20-10-1, E20-10-D, E20-10-D-1, E20-10-D-I, E20-10-D-1-I. User’s Guide. Moscow: ZAO «L-Card», 2021. 79 pp. (In Russian).
14. *Belenki L.B., Borovik S.Y., Raykov B.K., Sekisov Y.N., Skobelev O.P., Tulupova V.V.* Methods for Measuring Blasé Tips Displacements in Compressors and Turbines on the base of Distributed Sensors’ Clusters. Part 1. Justification and description of the proposed methods // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2009, 4. P. 16–19. (In Russian).
15. *Belenki L.B., Borovik S.Y., Raykov B.K., Sekisov Y.N., Skobelev O.P., Tulupova V.V.* Methods for Measuring Blasé Tips Displacements in Compressors and Turbines on the base of Distributed Sensors’ Clusters. Part 2. Method feasibility // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2009, 5. P. 21–30. (In Russian).
16. *Belopukhov V.N., Borovik S.Y., Kuteynikova M.M., Podlipnov P.E., Sekisov Y.N., Skobelev O.P.* Method for radial clearance measuring in a gas turbine engine with self-compensation of temperature effects on the sensor // *Datchiki i Sistemy*, 2018, 4. P. 53–59. (In Russian).
17. DSP Microcomputer ADSP-2185M. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADSP-2185M.pdf> (accessed June 23, 2022).
18. *Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N.* Blade Tips Radial Clearances and Axial Displacements Calculation Algorithm // *Proceedings of the XII International Conference “Complex Systems: Control and Modelling Problems”*, Samara, Russia, 2010. P. 323–327. (In Russian).
19. *Borovik S.Y., Raykov B.K., Sekisov Y.N., Skobelev O.P., Tulupova V.V.* Method for Quasi-Parallel Measurements and Calculations of the Coordinates of the Blades Tips Multidimensional Movements // *Proceedings of the V International Conference “Complex Systems: Control and Modelling Problems”*, Samara, Russia, 2003. P. 506–511. (In Russian).
20. *Belopukhov V.N., Malov A.N., Podvigin V.N.* Device for fixing the moment when the back edge of the pulse passes a given level / Author’s certificates of the USSR no. 4332427/24-21, 1990. (In Russian).