

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.518

СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ С САМОКОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

Аннотация. *Статья посвящена принципам построения систем измерения радиальных зазоров в компрессорах газотурбинных двигателей, реализующих метод измерения на основе применения одновиткового вихретокового датчика с чувствительным элементом в виде отрезка проводника и самокомпенсацией температурных воздействий на датчик. Метод предполагает использование всего одного одновиткового вихретокового датчика, выполняющего как рабочие, так и компенсационные функции при единственном установочном отверстии в статорной оболочке силовой установки. Самокомпенсация осуществляется в рабочем режиме в процессе вращения рабочего колеса газотурбинного двигателя путем измерения и фиксации экстремальных значений эквивалентной индуктивности первичной обмотки согласующего трансформатора одновиткового вихретокового датчика при наличии контролируемой лопатки как в зоне чувствительности датчика, так и при ее отсутствии (т. е. при прохождении чувствительного элемента центром межлопаточного промежутка) с последующим вычислением разности полученных результатов. Полученная разность не зависит от температурных воздействий на элемент конструкции датчика. Благодаря такой самокомпенсации отпадает необходимость в дополнительном датчике, традиционно используемом для термокомпенсации, а значит, и соответствующем установочном отверстии в статорной оболочке. Это и определяет преимущества предлагаемого метода по сравнению с известными. В статье рассматривается обобщенная структурно-функциональная схема системы измерения, реализующей указанный метод, а также приводятся основные алгоритмы ее функционирования, включая алгоритмы поиска экстремальных значений кодов в межлопаточном промежутке, вычисления разностных кодов и устранения недокомпенсации температурных воздействий на датчик, а также идентификации номеров лопаток рабочего колеса при асинхронном опросе первичных преобразователей.*

Ключевые слова: *газотурбинный двигатель, радиальные зазоры, одновитковый вихретоковый датчик, самокомпенсация температурных воздействий, система измерения, принципы построения, алгоритмы.*

Белопухов Валентин Николаевич (к.т.н.), старший научный сотрудник.

Боровик Сергей Юрьевич (д.т.н.), ведущий научный сотрудник.

Кутейникова Марина Михайловна (к.т.н.), старший научный сотрудник.

Подлипнов Петр Евгеньевич, младший научный сотрудник.

Введение

Известны методы измерения радиальных зазоров (РЗ) между статорной обочкой и торцами рабочих лопаток в турбомашине на основе применения одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1–2]. Указанные методы предполагают использование двух ОВТД, включенных в дифференциальную измерительную цепь с импульсным питанием. При этом один датчик выполняет рабочие функции, а второй обеспечивает компенсацию температурных воздействий среды на результат измерения. Очевидным недостатком методов является необходимость в двух установочных отверстиях на статорной оболочке турбомашин, что может негативно сказаться на прочностных свойствах силовой установки. Кроме того, учитывая существенную сложность в подборе пар ОВТД с идентичными параметрами, добиться полной термокомпенсации зачастую не представляется возможным.

Это послужило стимулом к разработке методов с самокомпенсацией температурных воздействий, рассчитанных на использование одного ОВТД, выполняющего как рабочие, так и компенсационные функции при единственном установочном отверстии в статорной оболочке [3–5]. Самокомпенсация осуществляется в процессе вращения рабочего колеса, когда согласно предложенному в [3–5] методу производится измерение и фиксация экстремальных значений эквивалентной индуктивности первичной обмотки согласующего трансформатора (СТ) ОВТД при наличии контролируемой лопатки в зоне чувствительности датчика и при ее отсутствии, т. е. при прохождении чувствительного элемента центром межлопаточного промежутка. Затем вычисляется разность полученных результатов, которая не зависит от температурных воздействий на элементы конструкции ОВТД и датчик в целом. Благодаря самокомпенсации при реализации предлагаемого метода отпадает необходимость в дополнительном ОВТД для термокомпенсации и соответствующем установочном отверстии в статорной оболочке, что и определяет преимущества предлагаемого метода по сравнению с известными.

В статье рассматриваются принципы построения систем измерения РЗ в компрессоре, реализующих предложенную идею самокомпенсации температурных воздействий на ОВТД на уровне структурно-функциональной схемы и базовых алгоритмов функционирования системы.

Структурно-функциональная схема системы измерения

Обобщенная структурно-функциональная схема системы, реализующая метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД [3–5], представлена на рис. 1.

ОВТД размещается на объекте измерения (в установочном отверстии статорной оболочки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД)). Изменения РЗ преобразуются в изменения индуктивности ЧЭ и первичной обмотки СТ ОВТД, которые, в свою очередь, преобразуются в изменения напряжения и цифрового кода аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в составе измерительной цепи (ИЦ) с приближенным дифференцированием тока в ОВТД [6, 7].

Предполагается, что система работает в «старт-стопном» режиме, причем процессы измерения РЗ производятся на одном или нескольких оборотах рабочего колеса компрессора по всем без исключения установленным на нем лопаткам. Предполагается также наличие в системе датчика оборотов рабочего колеса и соответствующей «метки» на валу двигателя.

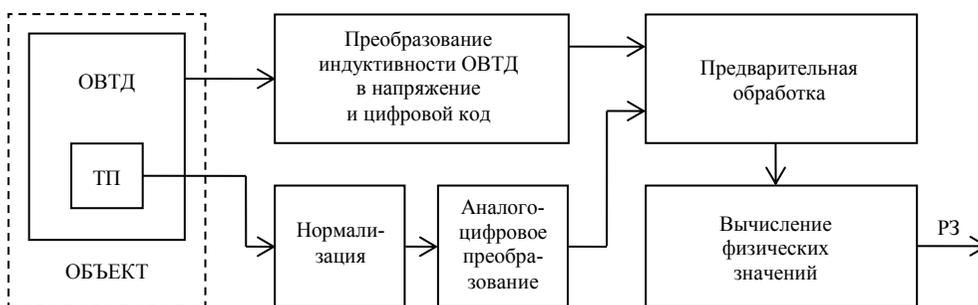


Рис. 1. Обобщенная структурно-функциональная схема системы измерения на основе метода с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД

По сигналу «старт» коды АЦП с постоянной частотой (до 5 МГц) поступают на предварительную обработку. Если выбран режим работы, предусматривающий фиксацию кодов на одном обороте рабочего колеса, то возможны два варианта, первый из которых обеспечивает поиск экстремальных значений кодов, соответствующих прохождению лопатками ЧЭ ОВТД (реализация этого варианта осуществляется на нижнем уровне системы, выполненном на стандартном микроконтроллере). Второй вариант предусматривает предварительное сжатие данных и передачу на верхний уровень (ПЭВМ) только кодов в непосредственной близости к экстремальным значениям для последующей аппроксимации и вычисления экстремальных значений аппроксимирующих функций.

Определение экстремальных значений кодов, которые согласно реализуемому в системе методу соответствуют центрам межлопаточных промежутков, производится на нижнем уровне системы. При этом используется оригинальный способ, предусматривающий экспериментальное определение верхней и нижней границ разброса кодов в неподвижном положении рабочего колеса, когда центр ЧЭ ОВТД совмещен с центром одного из межлопаточных промежутков. Затем производится статистическая обработка кодов, зафиксированных на одном обороте вращения ротора, в ходе которой определяется распределение числа кодов из зафиксированного массива, соответствующих значениям кода между верхней и нижней границей его разброса. Полученная гистограмма позволяет дать оценку наиболее вероятного значения кода, соответствующего центрам всех межлопаточных промежутков рабочего колеса компрессора ГТД. Такой способ определения экстремальных значений кодов наиболее эффективен, поскольку зависимость кода от времени в области экстремальных значений имеет весьма пологий характер, где применение алгоритмов прямого поиска не обеспечивает необходимой точности.

В соответствии с методом [3–5] вычисляется разность полученных экстремальных значений кодов (для каждой лопатки и центра межлопаточных промежутков, найденных статистическим способом). Разность кодов характеризует искомые значения РЗ. Однако в процессе исследований ИЦ с приближенным дифференцированием токов в ОВТД была обнаружена так называемая «недокомпенсация» температурных воздействий на ОВТД, связанная с особенностями функционирования ИЦ, и для ее устранения предложен способ коррекции, предусматривающий умножение полученной разности кодов на безразмерный коэффициент, зависящий от температурных воздействий на ОВТД [7]. При этом

информация о температурных воздействиях поступает с термопары (ТП), встроенной в ОВТД. Э.д.с. ТП после нормализации, аналого-цифрового преобразования и предварительной обработки (см. рис. 1) обеспечивает необходимые изменения указанного коэффициента, а также соответствующую коррекцию разности кодов. Эти операции завершают обработку измерительной информации на нижнем уровне, а скорректированная разность кодов передается на верхний уровень (в ПЭВМ), где вычисляются физические значения РЗ.

Для повышения достоверности определения разности экстремальных значений кодов (еще на этапе, предшествующем устранению «недокомпенсации» температурных воздействий на ОВТД) в системе предусмотрено усреднение исходных данных на нескольких оборотах рабочего колеса. Что же касается устранения влияния «недокомпенсации» температурных воздействий, то оно осуществляется после получения усредненных значений разности кодов.

Вычисление физических значений РЗ (см. рис. 1) производится с помощью градуировочных характеристик (ГХ) в виде зависимости разности кодов (ΔC) от координаты y (в системе отсчета $OXYZ$, начало которой привязано к внутренней поверхности статора, координате y соответствует РЗ) и температуры Θ в газоздушном тракте ($\Delta C(y, \Theta)$). Описания оборудования для экспериментальных исследований ГХ, методики их получения, а также применения ГХ в расчетах РЗ (y -координаты) можно найти в работах [1, 2].

Алгоритмы функционирования систем измерения

Далее рассматривается алгоритмическое обеспечение систем измерения РЗ, реализующих метод с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД. Приводятся описания алгоритмов обработки кодов в межлопаточных промежутках, процедур вычисления разностных кодов и термокоррекции, а также алгоритмов определения значений экстремальных кодов на одном и на нескольких оборотах вращения рабочего колеса компрессора ГТД. Также приводится описание процедуры идентификации номеров лопаток для случая отсутствия синхронизации опроса ОВТД с периодом вращения ротора турбокомпрессора (асинхронный опрос). Предлагаемые алгоритмы могут служить основой для реализации нижеуровневой обработки кодов (на уровне микроконтроллера) в системах измерений радиальных смещений торцов лопаток, ориентированных на применение в стендовых условиях испытаний ГТД.

Алгоритм определения экстремальных значений кодов в межлопаточном промежутке. В соответствии с предложенным методом измерения РЗ с самокомпенсацией [3–5] предполагается вычисление разности двух экстремальных значений кодов, относящихся к одной и той же лопатке, – кода, соответствующего экстремуму выходного сигнала ОВТД при прохождении лопаткой его ЧЭ, и кода, соответствующего прохождению под ЧЭ этого же ОВТД центра межлопаточного промежутка. При этом с высокой степенью вероятности можно предположить, что температурное поле достаточно равномерно распределено по объему ступени турбокомпрессора, а потому можно отказаться от определения экстремума в каждом межлопаточном промежутке рабочего колеса компрессора и воспользоваться единым усредненным значением, полученным за один или несколько оборотов ротора. Очевидным преимуществом такого подхода является снижение влияния помех на результат преобразования. При этом среднее значение кода в межлопаточном промежутке можно рассматривать как оценку мате-

математического ожидания и вычислять различными способами.

В качестве первого способа может быть предложен очевидный алгоритм усреднения экстремумов кодов по всем межлопаточным промежуткам рабочего колеса. Недостатком такого подхода является то, что при наличии мультипликативной помехи полученная таким образом оценка математического ожидания будет смещенной и ее эффективность ограничена числом лопаток рабочего колеса. Кроме того, реализация данного способа требует предварительного поиска множества локальных экстремумов, что отрицательно сказывается на быстроте действия алгоритма.

Поэтому более целесообразным представляется использование второго варианта алгоритма, предусматривающего статистическую обработку кодов, зафиксированных на одном обороте вращения лопаточного колеса [8]. В ходе такой обработки строится распределение кодов, которое позволяет дать оценку наиболее вероятного значения кода, соответствующего центрам всех межлопаточных промежутков рабочего колеса. При этом не требуется выполнять поиск локальных экстремумов, а в расчетах используется множество отсчетов кода для каждого межлопаточного промежутка, охватывающее диапазон возможных случайных помех. Это делает оценку математического ожидания менее смещенной и значительно более эффективной по сравнению с первым вариантом.

Ниже приведены основные операции такого алгоритма, выполняемые последовательно.

Предварительным этапом работы алгоритма является оценка размаха случайной помехи при отсутствии лопатки в зоне чувствительности датчика, которая проводится на неработающей турбомашине. Для этого при помощи ручного привода рабочее колесо устанавливают по отношению к ОВТД таким образом, чтобы ЧЭ датчика находился в центре межлопаточного промежутка. Далее регистрируют тестовый массив с заданным количеством отсчетов кодов АЦП и определяют размах случайной составляющей помехи $\Delta_n = a_0 - b_0$, где a_0 и b_0 – минимальный и максимальный коды в полученной выборке. На этом подготовительный этап работы алгоритма завершается.

В рабочем режиме функционирования турбомашин в течение одного или нескольких периодов вращения рабочего колеса формируется массив статистического распределения кодов (гистограмма) $g[C]$, где индекс C соответствует величине зарегистрированного кода, а значением элемента массива является частота его появления в выборке. Очевидно, что размер массива $g[C]$ равен диапазону выходных кодов АЦП и при использовании 10-разрядного АЦП содержит 2^{10} элементов.

Одновременно с формированием массива $g[C]$ фиксируется минимальное значение кода a , которое определяется температурными воздействиями на ОВТД и в общем случае не равно a_0 . Далее в массиве $g[C]$ выделяется коридор индексов $[a..b]$, соответствующий Δ_n , где $b = a + \Delta_n$. В дальнейшем данный участок гистограммы рассматривается как полная группа событий. На завершающем этапе работы алгоритма определяют суммарное количество кодов, попавших в выделенный коридор $[a..b]$:

$$q = \sum_{C=a}^b g[C] \quad (1)$$

и вычисляют математическое ожидание:

$$\bar{C}_{II} = \frac{1}{q} \sum_{C=a}^b C \cdot g[C], \quad (2)$$

которое принимают за единое среднее значение кода для всех межлопаточных промежутков.

Блок-схема алгоритма определения среднего значения кода в межлопаточных промежутках при условии синхронизированного с вращением ротора компрессора опросе ОБТД представлена на рис. 2.

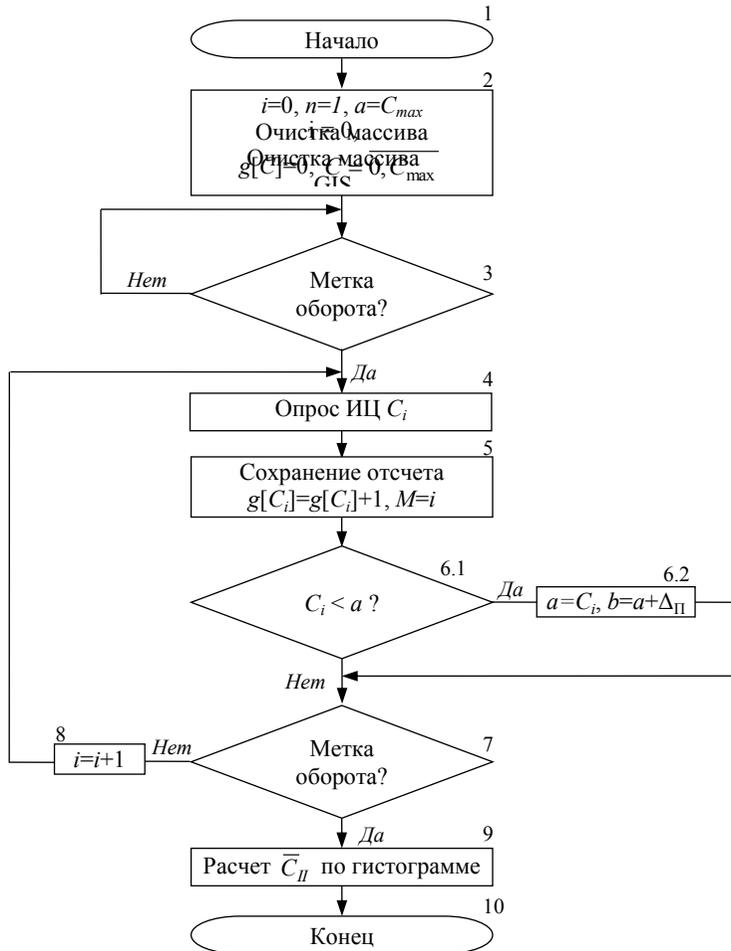


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета усредненного кода межлопаточных промежутков

В качестве входного параметра алгоритма используется полученная на предварительном этапе оценка размаха случайной составляющей кодов Δ_{II} , обусловленной влиянием помех. Работа алгоритма начинается с инициализации входных переменных и исходного обнуления элементов массива статистического распределения кодов (гистограммы) $g[C]$ (блок 2).

Процесс накопления данных производится в течение одного полного оборота рабочего колеса компрессора. Начало и окончание этого оборота отслеживаются логическими операторами появления метки (блоки 3 и 7 соответственно), а ну-

мерация отсчетов кода i производится в блоке 8. При этом производится опрос ИЦ с ОВТД, выполняется прием очередного отсчета кода C_i (блок 4), отсчет регистрируется в ячейке массива гистограммы $g[C_i]$ и производится запоминание суммарного числа отсчетов M за оборот рабочего колеса (блок 5). В рамках того же цикла в блоках 6.1 и 6.2 определяются границы коридора $[a\dots b]$, соответствующего размаху случайной помехи Δ_{Π} .

По окончании цикла опроса ОВТД (оборота рабочего колеса) в соответствии с выражениями (1) и (2) в блоке 9 производится расчет единого усредненного значения кода для межлопаточных промежутков.

При отсутствии синхронизации опроса ОВТД с периодом вращения рабочего колеса компрессора ГТД алгоритм рис. 2 будет иметь ряд особенностей. В частности, так как отсутствие синхронизации не позволяет точно выделить полный оборот ротора турбокомпрессора, размер массива $g[C]$ для накопления гистограммы должен задаваться фиксированным по критерию достаточности объема выборки. При этом отпадает необходимость в фиксации размера этого массива (M) в блоке 5, а условием окончания цикла накопления гистограммы (блок 7) будет достижение текущим номером опроса i значения M . Остальные операции по накоплению и обработке полученной выборки кодов сохраняются неизменными.

В заключение описания алгоритма расчета усредненного кода межлопаточных промежутков следует отметить, что фактическая величина \bar{C}_{Π} монотонно зависит от температуры, а потому указанную оценку можно использовать как альтернативный способ определения температуры в зоне размещения ОВТД.

Процедуры вычисления разностных кодов и устранения недокомпенсации температурных воздействий на датчик. Как уже отмечалось, в соответствии с реализуемым в системе методом измерения искомые значения РЗ определяются по разности экстремальных значений кодов для каждой лопатки (C_i) и центра межлопаточных промежутков (\bar{C}_{Π}). Реализация данного подхода возможна как минимум в двух вариантах. Первый, прямой алгоритм предполагает определение экстремальных значений кодов, соответствующих прохождению торцами каждой контролируемой лопатки ЧЭ ОВТД ($C_{i,i}$, где i – номер лопатки), вычисление экстремальных значений кодов для межлопаточного промежутка как единого среднего значения за период вращения лопаточного колеса (\bar{C}_{Π}) и нахождение требуемой разности ($\Delta C_i = C_{i,i} - \bar{C}_{\Pi}$).

В то же время, учитывая тенденции использования в программном обеспечении подобных систем измерения низкоуровневой обработки данных (на уровне микроконтроллера), для повышения производительности и упрощения последующих вычислительных процедур представляется целесообразным изменить порядок операций самокомпенсации. Тогда в соответствии со вторым вариантом реализации алгоритма сначала необходимо ликвидировать сдвиг кодов, вызванный температурным воздействием на элементы конструкции ОВТД непосредственно на уровне элементов исходного массива кодов ($\Delta C_j = C_j - \bar{C}_{\Pi}$, где j – порядковый номер отсчета АЦП), а затем найти экстремальные значения разностных кодов (ΔC_i).

При этом следует отметить, что при программной реализации процедуры вычисления указанной разности \bar{C}_{Π} будет представлять собой действительное число с плавающей запятой, которое в бинарном виде в памяти микроконтролле-

ра кодируется последовательностью из 4 байт, а C_j – целое число, которое занимает в памяти микроконтроллера 2 байта. В этом случае округление ΔC_j до целочисленного значения (2 байта) приведет к потере точности алгоритма, а приведение к формату с плавающей запятой (4 байта) потребует дополнительных ресурсов оперативной памяти микроконтроллера и усложнит алгоритмы поиска экстремальных значений, которые целесообразно выполнять в рамках целочисленной арифметики.

В указанных условиях предлагается компромиссный вариант, предусматривающий разделение операций с целыми числами и действительными числами во времени. Предпосылкой для такого шага является линейность преобразований.

Значение кода \bar{C}_{II} может быть представлено в виде суммы целой (C_0) и дробной (ε_0) его частей:

$$\bar{C}_{II} = C_0 + \varepsilon_0. \quad (3)$$

Тогда целые части разностей ΔC_j для каждого j -го отсчета можно определить в соответствии с выражением

$$[\Delta C_j] = C_j - C_0, \quad (4)$$

а затем учесть и дробные части путем вычитания ε_0 :

$$\Delta C_j = [\Delta C_j] - \varepsilon_0. \quad (5)$$

Для поиска экстремальных значений кодов в «нормализованном» массиве ΔC_j и формирования массива ΔC_i могут быть использованы различные алгоритмы, описания которых неоднократно приводились в литературных источниках [9–12]. Алгоритмы отличаются способом получения численных оценок и могут с разной степенью эффективности применяться для различных режимов работы силовой установки. Так, например, в переходных режимах работы турбомшины целесообразно использовать алгоритмы прямого поиска экстремумов либо осуществлять их оперативное накопление в буферной памяти системы для дальнейшей обработки с применением различных методов аппроксимации с поиском экстремума аппроксимированной функции [9, 10]. В свою очередь, на установленных режимах работы ГТД с большей эффективностью может быть использован оригинальный статистический алгоритм нахождения экстремумов с заданной точностью без применения аппроксимации огибающих кодов, соответствующих прохождению лопатками рабочего колеса ЧЭ ОВТД [11, 12].

Что же касается устранения так называемой «недокомпенсации» температурных воздействий на ОВТД, обнаруженной в процессе исследований влияний температуры на датчик и ИЦ [13, 14], то для ее устранения в работе [5] был предложен способ коррекции, предусматривающий умножение полученной разности кодов на безразмерный коэффициент, зависящий от температурных воздействий на ОВТД. При этом информация о температурных воздействиях поступает со встроенной в ОВТД термопары. С точки зрения программной реализации такая процедура представляет собой незначительное преобразование масштаба, которое всегда приводит к результату в виде действительных чисел. Поэтому применять ее целесообразно на заключительной стадии предварительной обработки кодов непосредственно перед вычислением физических значений измеряемых величин.

Алгоритм идентификации номеров лопаток рабочего колеса турбокомпрессора. Как известно, аппаратные средства синхронизации начала опроса ОВТД с периодом вращения ротора ГТД подразумевают применение в составе силовой установки как минимум двух элементов: датчика синхронизации в паре с меткой начала оборота на валу. Наличие таких средств позволяет легко идентифицировать номера лопаток в процессе испытаний турбомашин и упростить алгоритмы предварительной обработки данных. В то же время конструктивные особенности силовых установок зачастую ограничивают места установки датчиков и соответствующих меток на валу двигателя, что делает крайне затруднительной организацию соответствующих каналов синхронизации в системах измерения и вызывает определенные трудности в части адресной привязки результатов измерений к конкретным лопаткам.

Тем не менее решение задачи идентификации лопаток и привязки к ним результатов измерений возможно на основе использования конструктивных особенностей лопаточного колеса. Например, в работе [15] в качестве отличительного признака для «первой» лопатки предлагается выбирать самую длинную (минимальный РЗ) или самую короткую (максимальный РЗ) лопатку. К сожалению, подобный алгоритм обладает существенным недостатком – он перестает работать в случае наличия на лопаточном колесе двух и более «одинаково длинных» или «одинаков коротких» лопаток.

Ниже приводится алгоритм идентификации номеров лопаток в условиях отсутствия синхронизации начала опроса ОВТД с периодом вращения рабочего колеса турбокомпрессора с лучшими характеристиками в смысле устойчивости по отношению к алгоритму, рассмотренному [11]. Для упрощения изложения алгоритм представлен для работы с данными типа физических значений РЗ, что предполагает его реализацию на верхнем уровне программного обеспечения системы измерения (в ПЭВМ). Однако ничто не ограничивает применение данного алгоритма и на уровне анализа экстремальных значений кодов непосредственно в микроконтроллере.

Алгоритм требует выполнения подготовительной операции. На неработающем двигателе задают исходную нумерацию лопаток с учетом последовательности их размещения на колесе и формируют массив РЗ до каждой лопатки $\{Y[1], Y[2], \dots, Y[n_n]\}$, где $Y[i]$ – величина радиального зазора, i – индекс массива согласно принятой нумерации лопаток, n_n – число лопаток на рабочем колесе. Для этого поочередно при помощи ручного привода устанавливают каждую лопатку в зоне контроля (размещения ОВТД), измеряют любым известным способом величины РЗ между ее торцом и статорной оболочкой и фиксируют полученный результат. Поскольку фактические зазоры являются независимыми случайными величинами, распределенными в пределах допуска, совокупная последовательность РЗ является уникальной информацией, характерной лишь для конкретного рабочего колеса. Полученный массив можно считать эталонным и использовать далее для распознавания последовательности лопаток на рабочих режимах функционирования силовой установки [16].

Для идентификации лопаток и привязки к ним результатов измерения на рабочем режиме функционирования силовой установки производят не синхронизированный с частой вращения ротора турбомашин опрос ОВТД в соответствии с рассматриваемым методом. После необходимых преобразований информативных сигналов датчика, вычислений разностей кодов и расчета физических значений РЗ формируют массив зазоров с удвоенным числом элементов

$\{y[1], y[2], \dots, y[n_n], y[n_n + 1], \dots, y[2n_n]\}$, где $y[1] = y[n_n + 1]$ и т. д. – вычисленная величина РЗ до начальной лопатки с произвольным номером.

Последовательно совмещая начало эталонного массива с элементами массива результатов измерения РЗ, определяют евклидовы расстояния $\{J[1], J[2], \dots, J[n_n]\}$ между соответствующими элементами массивов по формуле

$$J[k] = \sum_{i=1}^{n_n} (y[i+k-1] - Y[i])^2, \quad (6)$$

где индекс $k = \overline{1, n_n}$ – величина смещения эталонного массива.

Минимальное евклидово расстояние между элементами эталонного массива и массива с результатами измерений зазоров характеризует наилучшее совпадение эталонного и полученного в результате измерения РЗ «образов» лопаточного колеса. Другими словами, если

$$J[m] = \min_{1 \leq k \leq n_n} J[k], \quad (7)$$

то в массиве с результатами измерений РЗ лопатке № 1 будет соответствовать элемент с индексом m , лопатке № 2 – элемент с индексом $m+1$ и т. д. Благодаря искусственному приему удвоения массивов результатов измерения РЗ удалось упростить индексацию при вычислении (6) и сделать алгоритм без ветвлений. Необходимо также отметить, что вместо (6) можно использовать взаимокорреляционную функцию [17] между эталонным массивом и массивом измеренных зазоров. Однако, как показала практика, в рассматриваемом случае оба варианта имеют одинаковые обнаружительные способности.

Блок-схема алгоритма идентификации номеров лопаток рабочего колеса турбокомпрессора приведена на рис. 3.

Работа алгоритма начинается с инициализации переменных (блок 2). Далее в теле цикла 3–5 формируется «сдвоенный» массив измеренных зазоров $\{y[1], y[2], \dots, y[n_n], y[n_n + 1], \dots, y[2n_n]\}$.

Расчет функционала $J[k]$ с накоплением суммы производится в блоке 7. Данный блок выполняется в теле внутреннего цикла для суммирования по всем лопаткам рабочего колеса при фиксированном сдвиге массивов (блоки 8 и 9). В свою очередь, внешний сдвиг эталонного массива относительно массива с результатами измерений организован блоками 12, 13.

Поиск минимального значения $J[k]$ с фиксацией соответствующего индекса m производится в блоках 10, 11. При этом, как отмечалось ранее, индекс m будет указывать на элемент массива результатов измерений РЗ для лопатки № 1.

Циклическая перестановка элементов массива измеренных РЗ с целью его упорядочивания относительно элемента, содержащего информацию об измеренном зазоре для лопатки № 1, производится в блоках 14–17. После того как элемент с результатом измерения РЗ для лопатки № 1 займет первое положение в массиве измеренных зазоров, алгоритм завершает свою работу. Далее привязанные к конкретным лопаткам РЗ могут быть отображены на мониторе ПЭВМ в своих штатных позициях.

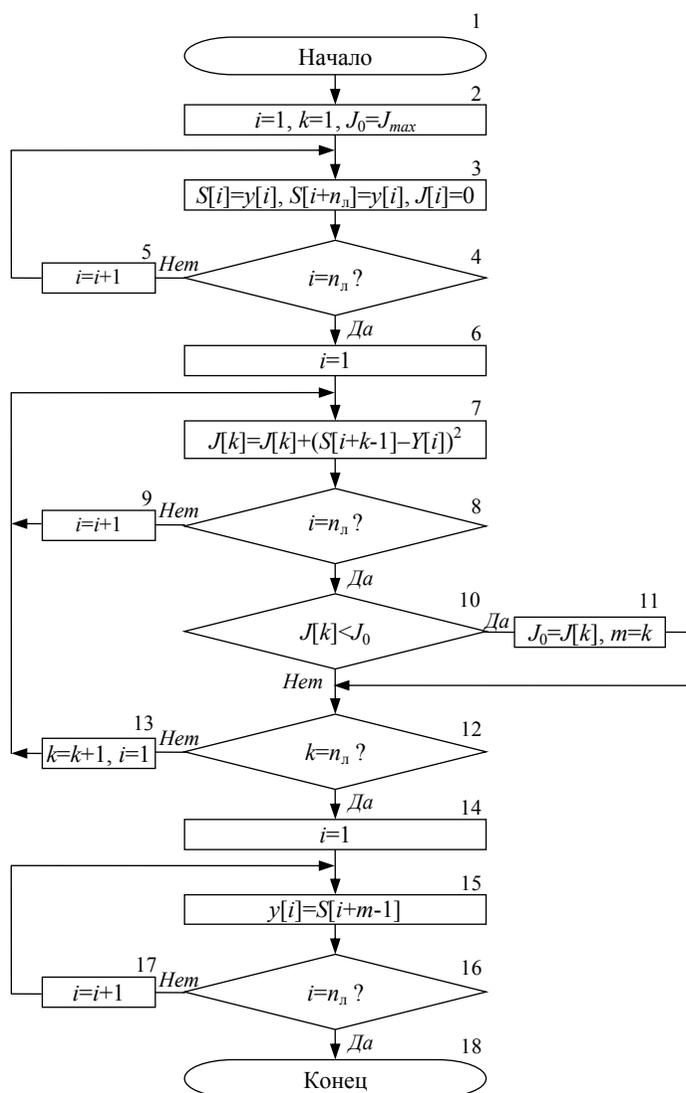


Рис. 3. Блок-схема алгоритма идентификации номеров лопаток рабочего колеса турбокомпрессора

Заключение

Рассмотрена обобщенная структурно-функциональная схема системы измерения РЗ, реализующая метод получения информации о радиальных смещениях торцов лопаток рабочего колеса компрессора ГТД с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик. Предложены базовые алгоритмы функционирования системы, включая алгоритмы поиска экстремальных значений кодов в межлопаточном промежутке, вычисления разностных кодов и устранения недокомпенсации температурных воздействий на датчик, а также идентификации номеров лопаток рабочего колеса при асинхронном опросе первичных преобразователей. Предложенные алгоритмы могут быть реализованы в программном обеспечении системы измерения подобного класса как на уровне микроконтроллера (нижний уровень), так и на верхнем уровне в ПЭВМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.
3. Пат. 2587644 РФ, МПК G01B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомшины / *В.Н. Белопухов, П.Е. Подлиннов, Б.К. Райков [и др.]*. – 2014154334/28; Заявл. 30.12.2014; Оpubл. 20.06.2016, бюл. 17.
4. *Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М. [и др.]* Самокомпенсация температурных воздействий на одновитковый вихретоковый датчик при измерении радиальных зазоров в компрессоре и турбине // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIX Межд. конф. – Самара: Офорт, 2017. – С. 535–537.
5. *Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М. [и др.]* Способ измерения радиальных зазоров в газотурбинном двигателе с самокомпенсацией температурных воздействий на датчик // Датчики и системы. – № 4. – 2018. – С. 53–59.
6. Пат. 2525614 РФ, МПК G01B 7/00. Устройство для измерения многокоординатных смещений торцов лопаток / *Л.Б. Бельский, М.М. Кутейникова, А.В. Логвинов [и др.]*. – 2012157903/28; Заявл. 27.12.2012; Оpubл. 20.08.2014, бюл. 3.
7. *Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. [и др.]* Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 10. – С. 38–46.
8. Пат. 2651622 РФ, МПК G01B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомшины / *В.Н. Белопухов, П.Е. Подлиннов, Ю.Н. Секисов*. – Заявл. 09.12.2016; Оpubл. 23.04.2018, бюл. 12.
9. *Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М.* Алгоритмы функционирования систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 35–46.
10. *Белопухов В.Н., Боровик С.Ю.* Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Межд. конф. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 650–654.
11. Пат. 2651628 РФ, МПК G01B 7/14. Способ измерения с заданной точностью радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомшины при дискретном поступлении информации с датчика / *В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлиннов [и др.]*. – Заявл. 07.11.2016; Оpubл. 23.04.2018, бюл. 12.
12. *Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлиннов П.Е.* Оценка погрешностей дискретизации при определении экстремальных значений кодов в системах измерения радиальных зазоров в компрессорах турбомашин // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2018. – № 1(57). – С. 47–54.
13. *Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. [и др.]* Анализ влияния температуры на информативные параметры одновитковых вихретоковых датчиков // Автометрия. – № 4 (53). – 2017. – С. 104–111.
14. *Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. [и др.]* Влияние температуры в проточной части турбины на результаты измерений радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Автометрия. – 2018. – № 1(54). – С. 124–131.
15. *Боровик С.Ю., Игначков С.М., Ильинский С.А. [и др.]* Система измерения радиальных зазоров на закапотированной винтовентиляторной установке // Известия вузов. Авиационная техника. – 2004. – № 3. – С. 77–79.
16. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
17. *Анисимов Б.В., Курганов В.Д., Злобин В.К.* Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высшая школа, 1983. – 295 с.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2018 г.

STRUCTURE AND OPERATION ALGORITHMS OF THE SYSTEMS FOR MEASURING OF RADIAL CLEARANCES WITH TEMPERATURE SELF-COMPENSATION

*V.N. Belopukhov, S.Yu. Borovik, M.M. Kuteynikova, P.E. Podlipnov*¹

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

Annotation. *The paper is dedicated to the principles of construction of the systems for measuring of radial clearances in compressors of gas-turbine engines. The methods realized in such systems are based on using of single-coil eddy-current sensors with sensitive elements made as a conductor strips and self-compensation of temperature influences on the sensor. The method also involves the using of only one sensor (it provides work and compensation functions) and as a result only one hole in the engine stator. The self-compensation procedure is carried out in operation mode during rotation of the rotor. It involves measuring and fixing of extreme values of equivalent inductance of primary winding of matching transformer of single-coil eddy-current sensor at the moments when the controlled blade is in sensor sensitivity area and when the blade is out of it (when sensor's sensitive element is in interblade zone) and further difference calculation between obtained results. This difference doesn't depend on temperature influence on sensor constructive elements. Because of this self-compensation there is no need in additional sensor for temperature correction an as the result there is no need to make additional hole in engine stator. Hence the proposed method is better compared to existing. The article considers the general structural and functional scheme of the system that realized the method with temperature self-compensation. The main operation algorithms of the system such as the algorithm for seeking of extreme codes in interblade zone, the algorithm for difference calculation between codes with the removal of "non-compensated" temperature influences on the sensor and the algorithm for blades numbers detection during asynchronous sensors surveying are given too.*

Keywords: *gas-turbine engine, radial clearances, single-coil eddy-current sensor, temperature self-compensation, measuring system, principle of construction, algorithm.*

REFERENCES

1. Methods and tools of measuring of multidimensional displacements of power plants' constructive elements / Ed. *Sekisov Yu.N., Skobelev O.P.* – Samara: Samara Scientific Center of RAS, 2001. – 188 pp.
2. Cluster methods and tools of measuring of deformation and coordinates of displacements of blade tips in gas-turbine engines / Ed. *Skobelev O.P.* – Moscow: Mashinostroenie, 2011. – 298 pp.
3. Pat. 2587644 RU. Method for measuring of radial clearances between blades tips and stator of turbomachine / *Belopukhov V.N., Podlypnov P.E., Raykov et.al.* // Bull. No. 17. – 2016.
4. *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M. et al.* Self-compensation of temperature effect on single-coil eddy-current sensor while measuring radial clearances in compressor and turbine // Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XIX international conference (Samara, September, 12-15, 2017). – pp. 535–537.
5. *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M. et al.* The method for measuring of radial clearances in gas-turbine engine with self-compensation of temperature effect on single-coil eddy-current sensor // Sensors & Systems. – No 4. – 2018 – 53–59 pp.
6. Pat. 2525614 RU. Device for measuring of multi-coordinate displacements of blades' tips / *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M. et al.*

¹*Valentin N. Belopukhov (Ph.D. (Techn.)), Senior Scientist.
Sergey Yu. Borovik (D.Sc. (Techn.)), Leading Scientist.
Marina M. Kuteynikova (Ph.D. (Techn.)), Senior Scientist.
Petr E. Podlipnov, Scientist.*

- kiy L.B., Kuteynikova M.M., Sekisov Yu.N.* // Bull. No. 3. – 2014.
7. *Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M., Raykov B.V. et al.* Measuring of radial clearances between turbine stator and complex shaped blades tips with the help of single-coil eddy-current sensors // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie.* – No.10. – 2013. – pp. 38–46.
 8. Pat. 2651622 RU. Method for measuring of radial clearances between blades' tips and stator of turbo-machine / *Belopukhov V.N., Podlypnov P.E., Raykov et.al.* // Bull. No. 12. – 2018.
 9. *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu., Kuteynikova M.M.* Operation algorithms of the systems for radial and axial displacements of the tips of complex shaped blades // *Measuring. Monitoring. Control.* – No.4. – 2016. – pp. 35–46.
 10. *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu.* Algorithm for detection of extreme values of codes in the system for measuring of radial and axial displacements of the tips of complex shaped blades // *Complex Systems: Control and Modeling Problems: Proc. of XV international conference (Samara, June, 28–28, 2013).* – pp. 650–654.
 11. Pat. 2651628 RU. Method for measuring with given accuracy of radial clearances between blades' tips and stator of turbo-machine with the discreet data obtaining / *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu., Podlypnov P.E. et. Al.* // Bull. No. 12. – 2018.
 12. *Belopukhov V.N., Borovik S.Yu., Podlypnov P.E.* Sampling errors estimation in the determination of codes extreme values in systems for measurements of radial clearances in compressors of turbomachines // *Vestnik SamGTU. Series «Technical Science».* – No.1(57). – 2018. – pp. 47–54.
 13. *Borovik S.Y., Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N. et al.* Optoelectron. Instrument. Proc. (2017) 53: 395. <https://doi.org/10.3103/S8756699017040124>.
 14. *Borovik S.Y., Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N. et al.* Optoelectron. Instrument. Proc. (2018) 54: 105. <https://doi.org/10.3103/S8756699018010168>.
 15. *Borovik S.Yu., Ignachkov S.M., Il'inskii S.A. et al.* A system of radial clearance measurements in the ducted propfan installation // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatsionnaya Tekhnika.* – No. 3. – 2004. – pp. 77–79.
 16. *Varakin L.E.* Communication systems with noise-like signals. – M.: Radio I Svyaz, 1985. – 384 pp.
 17. *Anisimov B.V., Kurganov V.D., Zlobin V.K.* Image recognition and digital procedding. – M.: Vysshaya shkola, 1983. – 295 pp.