

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.

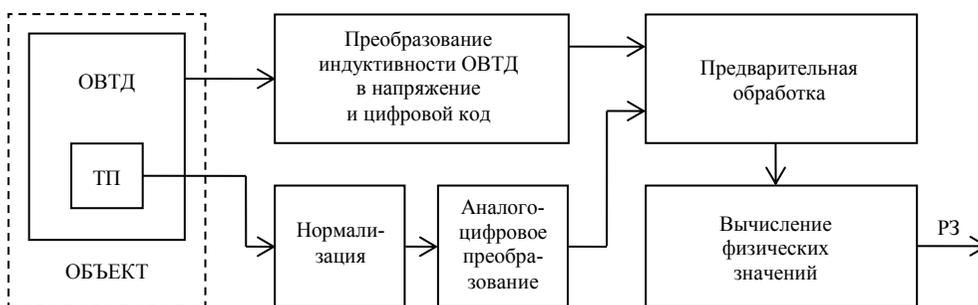


Рис. 1. Обобщенная структурно-функциональная схема системы измерения на основе метода с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД

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.

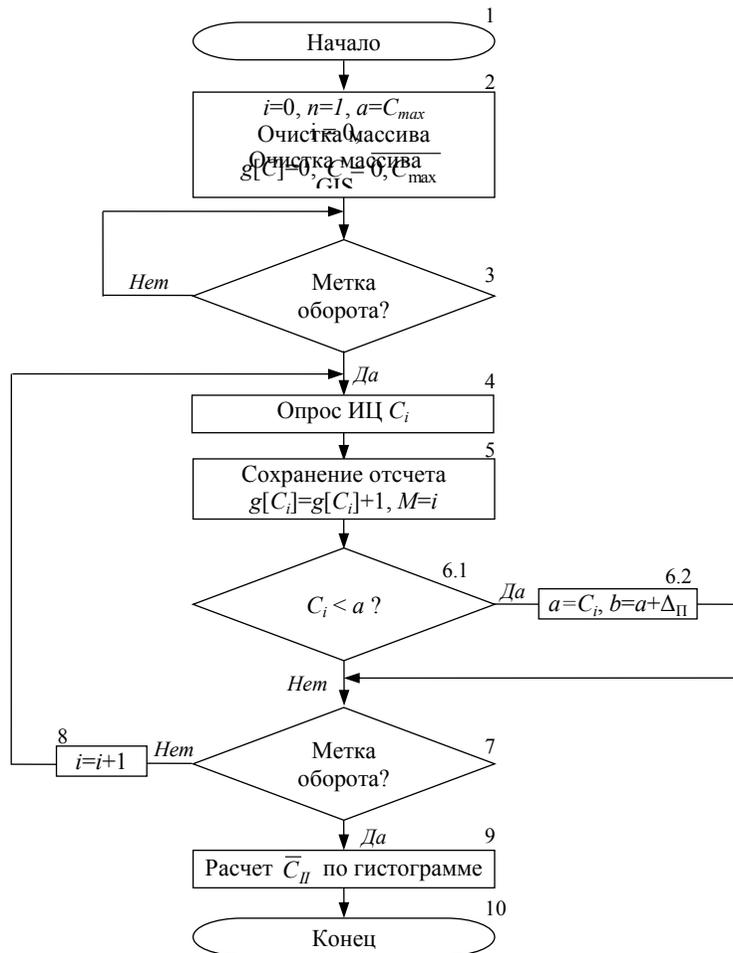


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета усредненного кода межлопаточных промежутков

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.

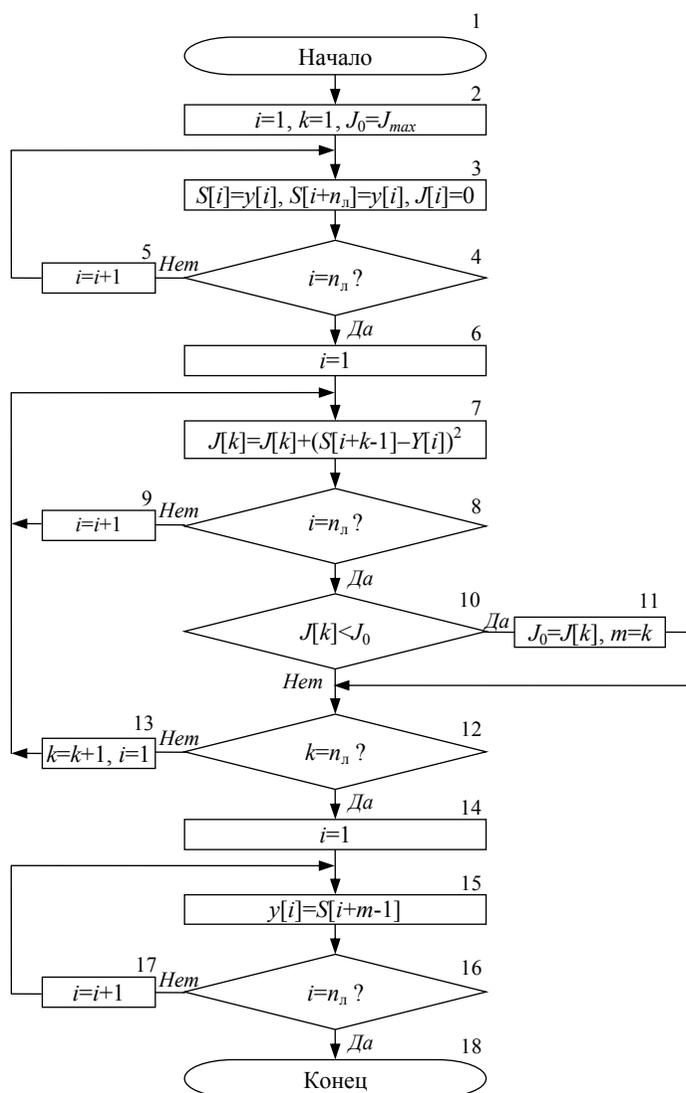


Рис. 3. Блок-схема алгоритма идентификации номеров лопаток рабочего колеса турбокомпрессора

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 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.

УДК 621.317

АНАЛИЗ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ С НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

Р.В. Гирин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: romangirin@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача определения погрешностей тепловизионной системы при техническом диагностировании электронных приборов с использованием нейронной сети. Описана структура системы, включающая измерительные каналы с тепловизором, термометром внешней среды, блок расчетных моделей тепловых состояний, базу знаний и нейросетевой программный анализатор термограмм. Предложено использовать для анализа состояний приборов двухветвенную нейронную сеть, состоящую из многослойной конволюционной нейронной сети и полносвязной сети. Построена метрологическая модель измерительных каналов. Приведена классификация составляющих инструментальной погрешности и предложены выражения для мультипликативной и аддитивной компонент инструментальной погрешности. Особое внимание уделено анализу методической погрешности, вызываемой использованием искусственной нейронной сети при классификации отказов в приборе. Выполнены экспериментальные исследования, которые подтвердили эффективность предложенных методологических и технических решений.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, анализ погрешностей, техническое диагностирование, тепловизор, инфракрасная термография.

Введение

Применение в информационно-измерительных системах (ИИС) искусственных нейронных сетей (ИНС) [1–5] ставит задачу оценки погрешности, вносимой в процессе контроля использованием ИНС. В работах [6–8] описана ИИС для диагностики электронных приборов методом сравнительной инфракрасной термографии [9] на основе нейронной сети. В то же время подходы к анализу погрешностей измерительных систем, содержащих нейронные сети, развиты недостаточно.

В статье проведен метрологический анализ измерительных каналов тепловизионной системы технического диагностирования (ТСТД) с нейросетевым программным анализатором на основе двухветвенной нейронной сети, выполняющей классификацию термограмм. Результатом работы нейронной сети является определение неисправностей в объекте [10].

В качестве объекта контроля рассматривается электронный прибор, находящийся в конструктиве некоторого объекта и функционирующий в штатном или испытательном режиме. Внутри прибора находится n источников тепла $Q^n(x_n, y_n, t)$, которые формируют температурное поле на поверхности прибора.

Гирин Роман Викторович, ассистент кафедры «Вычислительная техника».

Исследование факторов, определяющих погрешности ТСТД

Сделаем следующие допущения. Контролируемый прибор имеет форму параллелепипеда. Следовательно, надо рассматривать температурные поля на его гранях.

1. При креплении прибора в конструктиве системы как минимум одна грань будет соприкасаться со стенками конструкции. Максимальное число граней прибора, соприкасающихся с конструкцией, будет равно пяти. Тогда количество видимых поверхностей прибора, которые можно исследовать тепловизором, находится в диапазоне от одной до пяти граней.

2. Некоторые грани прибора, в частности имеющие интенсивный теплоотвод, могут быть изотермическими. В этом случае говорить о тепловой картине поверхности нет смысла. По существу, достаточно измерить интегральную температуру в какой-либо точке грани и сделать определенные выводы о техническом состоянии прибора. Но это не позволяет провести более тонкое исследование причин отказа и не требует использования интеллектуальной измерительной системы.

3. Таким образом, в дальнейшем будем рассматривать одну грань поверхности контролируемого прибора, температурное поле которой имеет заметный градиент.

Для анализа термограмм поверхности прибора автором предлагается использовать двухветвенную нейронную сеть, состоящую из многослойной конволюционной нейронной сети и полносвязной сети [6] и входящую в состав нейросетевого программного анализатора термограмм. Обучение ИНС проводится на модельных термограммах, соответствующих различным отказам в приборе и хранящихся в базе знаний. В процессе контроля измеренные термограммы и электрические параметры поступают на нейронную сеть, классифицирующую техническое состояние прибора.

На рис. 1 показана схема контроля приборов с интеллектуальной ТСТД, где используются следующие обозначения:

ИС – измерительная система, включающая каналы для определения термограмм и измерения электрических параметров прибора;

СПР – система принятия решений о техническом обслуживании прибора по результатам работы нейронной сети;

U – техническое обслуживание прибора по результатам тепловизионного диагностирования технических состояний;

W – электрическая мощность, поступающая на входы прибора;

V – значения параметров, дополнительно измеряемых в контролируемом приборе;

$\Theta(x, y)$ – установившееся распределение температур на плоской грани прибора;

$\Gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k)$ – множество теплофизических и конструктивных параметров прибора, учитываемых при построении математической модели в виде уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = a \nabla^2 \Theta + Q(x, y, t),$$

где ∇^2 – оператор Лапласа;

Z – формальная постановка задачи определения температурного поля выбранным численным методом;

$\Theta^M(x, y)$ – модельное распределение температур на грани прибора;
 $\{\Theta_j^M(x, y)\}$ – множество модельных термограмм в базе знаний, используемых при обучении ИНС, $j = \overline{1, J}$, J – объем обучающей выборки;
 V_j^M , $j = \overline{1, J}$ – модельные значения дополнительных параметров прибора;
 $\Theta_P^{ИЗМ}(x, y)$ – измеренная термограмма установившегося распределения температур, полученная с помощью измерительного канала, включающего в себя тепловизор;
 $V_P^{ИЗМ}$ – множество реально измеренных значений дополнительных параметров;
 D_0, D_1, \dots, D_K – выходы ИНС, соответствующие техническим состояниям прибора, при этом D_0 – работоспособное состояние, а остальные выходы – состояния неисправностей.

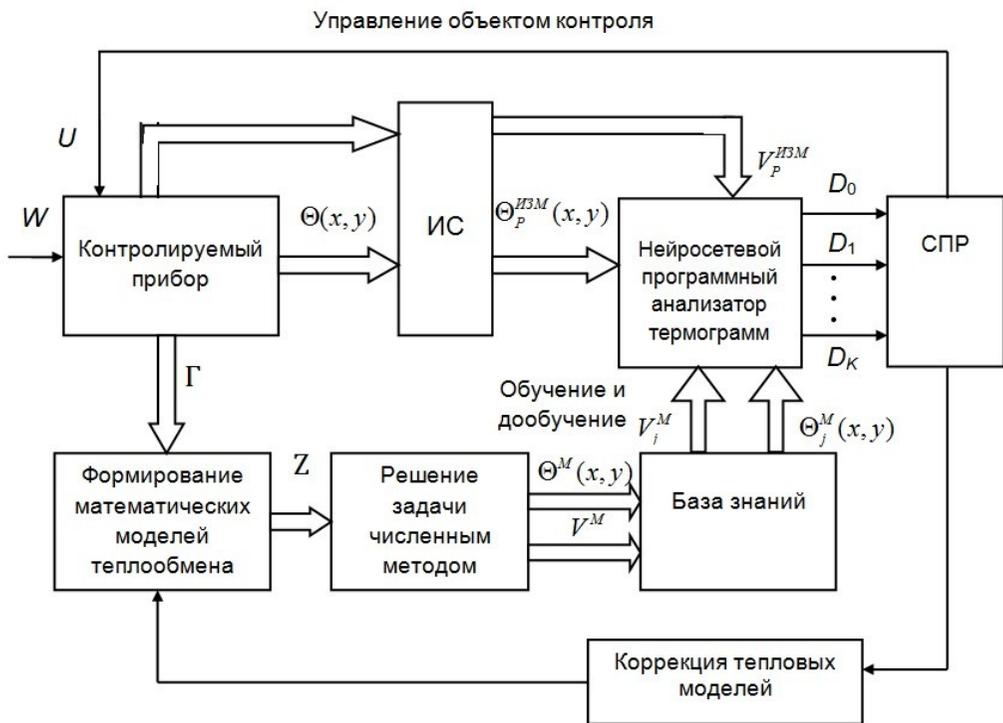


Рис. 1. Тепловизионная система с нейронной сетью для контроля приборов

Во время испытаний и текущего контроля приборов результаты работы нейронной сети фиксируются в базе знаний и в дальнейшем используются для коррекции параметров математических моделей теплообмена. Это позволяет уточнить модельные термограммы и повысить достоверность диагностики объектов.

Метрологическая модель измерительных каналов

Для иллюстрации подхода к анализу погрешностей в ИИС с нейронной сетью рассматривается интеллектуальная измерительная система диагностирования отказов в микросхеме матрицы ПЗС в оптико-электронном преобразователе [5]. Этот блок является основным в системе дистанционного зондирования Земли.

Структурная модель измерительных каналов для анализа технического состояния прибора по термограммам представлена на рис. 2.

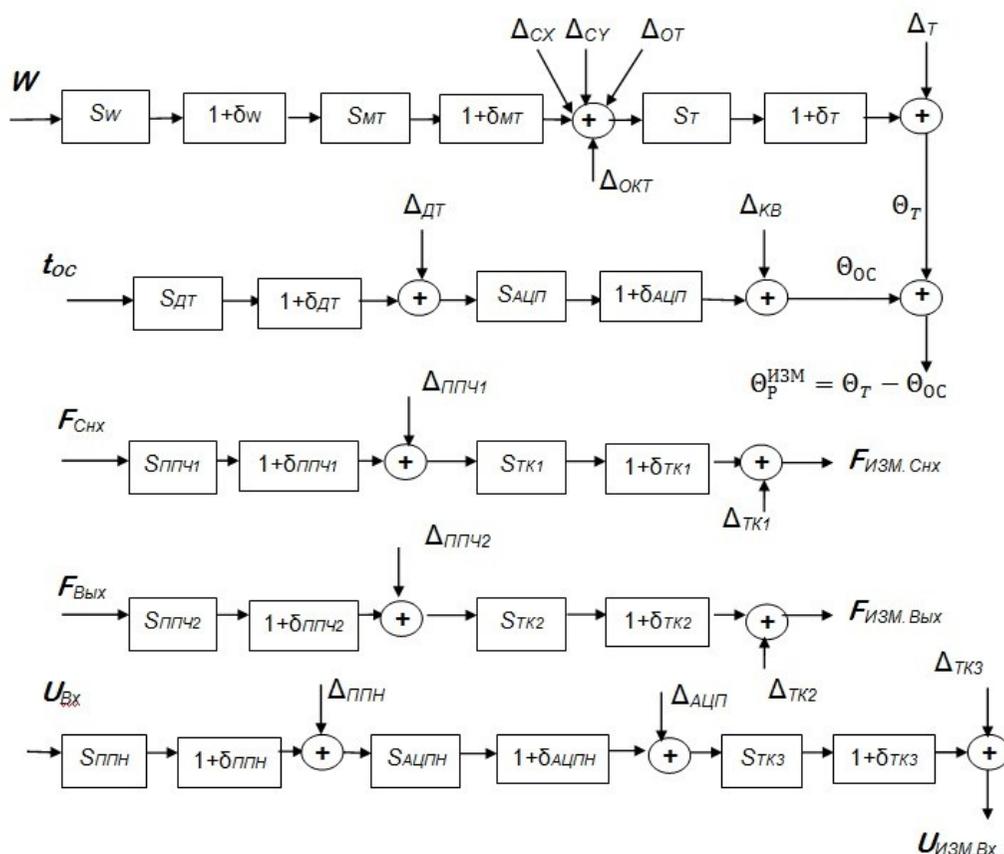


Рис. 2. Структурная модель измерительных каналов

Номинальная функция преобразования [12, 13] при измерении температурного поля равна

$$\Theta_{ИЗМ}^{НОМ}(x, y) = S_W S_{MT} S_T W - S_{DT} S_{AЦП} t_{OC}, \quad (1)$$

где S_W – функция преобразования электрической мощности W , поступающей на входы прибора, в двумерное температурное поле $\Theta(x, y)$ на контролируемой поверхности;

S_{MT} – чувствительность канала передачи температурного поля поверхности прибора на оптическую воспринимающую плоскость тепловизора;

S_T – чувствительность тепловизора;

S_{DT} – чувствительность первичного преобразователя датчика температуры t_{OC} окружающей среды;

$S_{AЦП}$ – чувствительность функции преобразования аналого-цифрового

преобразователя в канале измерения окружающей среды.

Первый измерительный канал с входным сигналом W осуществляет определение температурного поля $\Theta_T(x, y)$ поверхности прибора. Второй канал измеряет температуру окружающей среды t_{OC} для дальнейшего вычисления перегрева точек поверхности $\Theta_P^{ИЗМ}(x, y) = \Theta_T - \Theta_{OC}$.

Множество V дополнительно измеряемых параметров матрицы ПЗС содержит три компоненты: $F_{Снх}$ – частота синхронизирующих сигналов; $F_{Вых}$ – частота выходных сигналов; $U_{Вх}$ – напряжение входных управляющих сигналов.

Номинальные функции преобразования для компонент множества V :

$$F_{ИЗМ.Снх}^{НОМ} = S_{ППЧ1} S_{ТК1} F_{Снх}, \quad (2)$$

$$F_{ИЗМ.Вых}^{НОМ} = S_{ППЧ2} S_{ТК2} F_{Вых}, \quad (3)$$

$$U_{ИЗМ.Вх}^{НОМ} = S_{ППН} S_{АЦПН} S_{ТК3} U_{Вх}, \quad (4)$$

где $S_{ППЧ1}, S_{ППЧ2}, S_{ППН}$ – чувствительности первичных измерительных преобразователей ППЧ1 и ППЧ2 частот и входного напряжения управляющих сигналов ППН;

$S_{ТК1}, S_{ТК2}, S_{ТК3}$ – чувствительности телеметрических каналов передачи соответствующих измеряемых параметров;

$S_{АЦПН}$ – чувствительность функции преобразования аналого-цифрового преобразователя в канале измерения входного напряжения.

Реальные функции преобразования для модели на рис. 2 имеют вид:

а) измерение термограммы

$$\Theta_P^{ИЗМ}(x, y) = S_T (1 + \delta_T) \{ (\Delta_{СХ} + \Delta_{СУ} + \Delta_{ОТ} + \Delta_{ОКТ} + S_{MT} S_W (1 + \delta_{MT}) (1 + \delta_W) W \} + \Delta_T - S_{АЦП} (1 + \delta_{АЦП}) (S_{ДТ} (1 + \delta_{ДТ}) t_{OC} + \Delta_{ДТ}) - \Delta_{КВ}, \quad (5)$$

б) измерение частотных сигналов

$$F_{ИЗМ.Снх} = S_{ТК1} (1 + \delta_{ТК1}) (\Delta_{ППЧ1} + S_{ППЧ1} (1 + \delta_{ППЧ1}) F_{Снх}) + \Delta_{ТК1} \quad (6)$$

$$F_{ИЗМ.Вых} = S_{ТК2} (1 + \delta_{ТК2}) (\Delta_{ППЧ2} + S_{ППЧ2} (1 + \delta_{ППЧ2}) F_{Вых}) + \Delta_{ТК2}, \quad (7)$$

в) измерение амплитуды напряжения входных сигналов

$$U_{ИЗМ.Вх} = S_{ТК3} (1 + \delta_{ТК3}) (S_{АЦПН} (1 + \Delta_{АЦПН}) (S_{ППН} (1 + \delta_{ППН}) U_{Вх} + \Delta_{ППН}) + \Delta_{АЦП}) + \Delta_{ТК3}. \quad (8)$$

Анализ погрешностей ТСТД

Погрешности, входящие в выражения (5) – (8), сведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Мультипликативные погрешности, учитываемые в структурной модели

Номер уравнения	Условное обозначение	Описание мультипликативной погрешности
5	δ_W	Погрешность, вызванная изменением электрических, теплофизических и конструктивных параметров при изготовлении серии микросхем

Номер уравнения	Условное обозначение	Описание мультипликативной погрешности
5	δ_{MT}	Погрешность чувствительности канала передачи термограммы на оптическую плоскость матрицы тепловизора
5	δ_T	Мультипликативная погрешность тепловизора
5	δ_{DT}	Погрешность первичного преобразователя датчика температуры окружающей среды
5	$\delta_{АЦП}$	Мультипликативная погрешность преобразования аналог – код в АЦП
6	$\delta_{ППЧ1}$	Погрешность первичного преобразователя измерения частоты синхронизирующих сигналов
6	δ_{TK1}	Погрешность канала передачи телеметрической информации о частоте синхронизирующих сигналов
7	$\delta_{ППЧ2}$	Погрешность первичного преобразователя измерения частоты выходных сигналов
7	δ_{TK2}	Погрешность канала передачи телеметрической информации о частоте выходных сигналов
8	$\delta_{ППН}$	Погрешность первичного преобразователя измерения входных управляющих сигналов
8	$\delta_{АЦПН}$	Мультипликативная погрешность преобразования напряжения в код в АЦП
8	δ_{TK3}	Погрешность канала передачи телеметрической информации об амплитуде входных управляющих сигналов

Таблица 2

Аддитивные погрешности, учитываемые в структурной модели

Номер уравнения	Условное обозначение	Описание аддитивной погрешности
5	Δ_{CX}, Δ_{CY}	Погрешности установки тепловизора, которые определяются горизонтальными смещениями относительно центральной оптической оси, перпендикулярной поверхности контролируемого прибора
5	Δ_{OT}	Погрешность, вызванная угловым отклонением оптической оси тепловизора от поверхности контролируемого прибора
5	Δ_{OKT}	Погрешность, вызванная отраженной кажущейся температурой других объектов
5	Δ_T	Аддитивная погрешность тепловизора
5	Δ_{DT}	Погрешность первичного преобразователя датчика температуры окружающей среды
5	Δ_{KB}	Погрешность квантования, определяемая разрядностью АЦП
6	$\Delta_{ППЧ1}$	Аддитивная погрешность измерения частоты $F_{Снх}$
6	Δ_{TK1}	Погрешность телеметрического канала частоты синхронизи-

Номер уравнения	Условное обозначение	Описание аддитивной погрешности
		рующих сигналов
7	$\Delta_{ППЧ2}$	Аддитивная погрешность измерения частоты $F_{Вых}$
7	$\Delta_{ТК2}$	Погрешность телеметрического канала частоты выходных сигналов
8	$\Delta_{ППН}$	Аддитивная погрешность измерения амплитуды входных управляющих сигналов
8	$\Delta_{АЦП}$	Погрешность квантования АЦП
8	$\Delta_{ТК3}$	Погрешность телеметрического канала напряжений входных управляющих сигналов

Погрешность измерения термограммы поверхности контролируемого прибора равна

$$\Delta\Theta = \Theta_P^{ИЗМ} - \Theta_{ИЗМ}^{НОМ},$$

и подставляя сюда выражения (1) и (5), получаем

$$\begin{aligned} \Delta\Theta = & (\delta_W + \delta_{MT} + \delta_T)S_W S_{MT} S_T W + (\delta_{ДТ} + \delta_{АЦП})S_{ДТ} S_{АЦП} t_{OC} + \\ & + S_T (\Delta_{CX} + \Delta_{CY} + \Delta_{OT} + \Delta_{ОКТ}) - S_{АЦП} \Delta_{ДТ} - \Delta_T - \Delta_{KB}, \end{aligned} \quad (9)$$

при этом погрешности считаются скалярными величинами, а их произведения – приближенно равными нулю.

Из выражения (9) следует, что мультипликативная погрешность измерения термограмм определяется как

$$\delta\Theta_{ИЗМ}^M = (\delta_W + \delta_{MT} + \delta_T)S_W S_{MT} S_T W + (\delta_{ДТ} + \delta_{АЦП})S_{ДТ} S_{АЦП} t_{OC}. \quad (10)$$

Соответственно аддитивная погрешность равна

$$\Delta\Theta_{ИЗМ}^A = S_T (\Delta_{CX} + \Delta_{CY} + \Delta_{OT} + \Delta_{ОКТ}) - S_{АЦП} \Delta_{ДТ} - \Delta_T - \Delta_{KB}. \quad (11)$$

Погрешности измерения частотных сигналов прибора:

$$\Delta F_{Сих} = F_{ИЗМ.Сих} - F_{ИЗМ.Сих}^{НОМ} \quad (12)$$

$$\Delta F_{Вых} = F_{ИЗМ.Вых} - F_{ИЗМ.Вых}^{НОМ}. \quad (13)$$

Выполняя аналогичные подстановки выражений (2) и (6) в (12); (3) и (7) в (13), получаем мультипликативные погрешности измерений

$$\delta F_{ИЗМ.Сих}^M = (\delta_{ППЧ1} + \delta_{ТК1})S_{ТК1} S_{ППЧ1} F_{Сих}$$

$$\delta F_{ИЗМ.Вых}^M = (\delta_{ППЧ2} + \delta_{ТК2})S_{ТК2} S_{ППЧ2} F_{Вых}$$

и аддитивные погрешности

$$\Delta F_{ИЗМ.Сих}^A = S_{ТК1} \Delta_{ППЧ1} + \Delta_{ТК1}$$

$$\Delta F_{ИЗМ.Вых}^A = S_{ТК2} \Delta_{ППЧ2} + \Delta_{ТК2}.$$

Погрешность измерения амплитуд входных управляющих сигналов U_{Bx} определяется аналогичным образом. Соответственно мультипликативная составляющая погрешности

$$\delta U_{ИЗМ.Bx}^M = (\delta_{ППН} + \delta_{АЦПН} + \delta_{ТКЗ}) S_{ТКЗ} S_{АЦПН} S_{ППН} U_{Bx}$$

и аддитивная составляющая равна

$$\Delta U_{ИЗМ.Bx}^A = S_{ТКЗ} S_{АЦПН} \Delta_{ППН} + S_{ТКЗ} \Delta_{АЦП} + \Delta_{ТКЗ} \quad .$$

Анализ методической погрешности канала с нейронной сетью

Использование расчетных термограмм при обучении ИНС вместо большого множества реальных термограмм приводит к методической погрешности Δ_M определения технического состояния объекта. Основными факторами, влияющими на величину Δ_M , являются:

- погрешность модели вычислительного метода решения нестационарного уравнения теплопроводности, а также погрешности дискретизации и округления;
- разброс теплофизических параметров прибора;
- вариативность геометрических параметров прибора;
- влияние архитектуры нейронной сети;
- влияние характера данных, обрабатываемых нейронной сетью;
- выбор способа и параметров обучения нейронной сети.

Структурная модель канала с двухветвенной нейронной сетью для формирования модельных термограмм, в которой учтены методические погрешности, представлена на рис. 3.

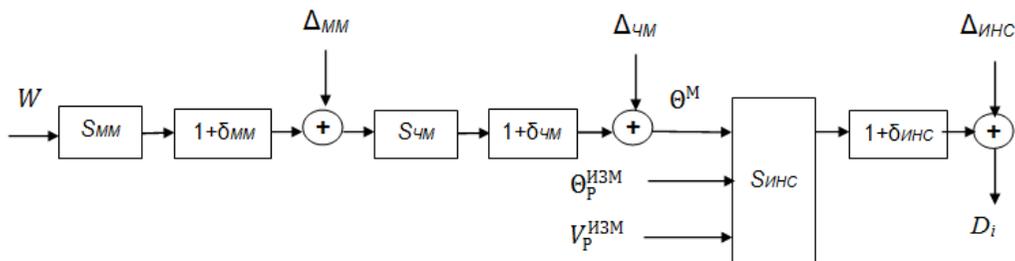


Рис. 3. Структурная модель канала с ИНС

Поскольку модельные термограммы получены путем решения нестационарного уравнения теплопроводности методом трехдиагональной прогонки, при анализе будем рассматривать составляющие методической погрешности, которые сведены в табл. 3.

В метрологической модели приняты следующие обозначения: $S_{MM} = S_\lambda S_\rho S_c S_\alpha S_\varepsilon$ – функция преобразования в математической модели параметров прибора в тепловое состояние, зависящая от значений теплофизических параметров прибора; $S_{ЧМ}$ – функция преобразования в численном методе решения уравнения теплопроводности; $S_{ИНС}$ – функция преобразования двухветвенной ИНС; δ_{MM} , $\delta_{ЧМ}$, $\delta_{ИНС}$, Δ_{MM} , $\Delta_{ЧМ}$, $\Delta_{ИНС}$ – мультипликативные и аддитивные погрешности соответственно математической модели, численного метода и искусственной нейронной сети.

Компоненты методической погрешности

Условное обозначение	Описание погрешности
<i>Аддитивные составляющие погрешности $\Delta_{\text{чМ}}$</i>	
Δ_{τ}	Погрешность от шага по времени τ
$\Delta_{\text{ДС}}$	Погрешности дискретизации
$\Delta_{\text{О}}$	Погрешность округления
Δ_h	Погрешность от шага h по сетке разностной модели
<i>Мультипликативные составляющие погрешности $\delta_{\text{ММ}}$</i>	
δ_{λ}	Мультипликативная погрешность неоднородности теплопроводности материала или отличия принятого при расчете значения λ от реального
δ_{ρ}	Мультипликативная погрешность неоднородности плотности ρ материала
δ_c	Мультипликативная погрешность неоднородности удельной теплоемкости c материала
δ_{α}	Мультипликативная погрешность от различия коэффициента конвективного теплообмена α по поверхности прибора
δ_{ϵ}	Мультипликативная погрешность от различия коэффициента теплового излучения ϵ по поверхности прибора
<i>Составляющие общей аддитивной погрешности $\Delta_{\text{ММ}}$</i>	
$\Delta_{Q_x}, \Delta_{Q_y}, \Delta_{Q_z}$	Погрешности смещения реальных координат источника с мощностью $Q(x, y, z)$ от расчетного источника с координатами $Q(x_0, y_0, z_0)$ при численном решении уравнения теплопроводности

Используя вышеописанный подход, можно найти общее выражение для методической погрешности канала определения Θ^M , включающего математическую модель и численный метод решения:

$$\Delta\Theta^M = (\delta_{\lambda} + \delta_{\rho} + \delta_c + \delta_{\alpha} + \delta_{\epsilon} + \delta_{\text{чМ}})S_{\lambda}S_{\rho}S_cS_{\alpha}S_{\epsilon}S_{\text{чМ}}W + (\Delta_{Q_x} + \Delta_{Q_y} + \Delta_{Q_z})S_{\text{чМ}} + \Delta_h + \Delta_{\tau} + \Delta_{\text{ДС}} + \Delta_{\text{О}}. \quad (14)$$

Из выражения (14) далее можно получить формулы для мультипликативной и аддитивной составляющих методической погрешности.

Проблема возникает с определением погрешностей, вызываемых использованием ИНС, поскольку в настоящий момент нет общепринятых методик для их оценки. Известные работы не дают расчетных методик и ограничиваются общими рассуждениями о природе методической погрешности ИНС [14, 15]. В работе [14] предлагается считать погрешность, вносимую аппаратным обеспечением, выполняющим программную логику ИНС, пренебрежимо малой величиной по сравнению с погрешностью, обусловленной качеством обучения и выбранной архитектурой ИНС. Аналогичное допущение сделано и в настоящей статье.

Одним из важных факторов, влияющих на точность классификации в ИНС, является соответствие ее архитектуры выполняемой задаче. На сегодняшний день известно несколько модификаций ИНС, каждая из которых в той или иной степени подходит для решения какой-либо отдельно взятой категории задач [16–

18]. Формального критерия применимости некоторой модификации ИНС для обработки тех или иных данных, к сожалению, нет. Систематизируя экспериментальные данные, накопленные в различных публикациях, можно сформулировать определенные критерии применимости некоторых типов ИНС, наиболее хорошо показавших себя при решении определенной группы задач.

Для рассматриваемой задачи анализа термограмм примером учета влияния архитектуры ИНС на получаемую точность классификации является выбор конволюционной нейронной сети вместо полносвязной. Известен ряд особенностей конволюционных нейронных сетей, которые делают их более производительными в ряде задач, связанных с обработкой изображений [16, 19]. Конволюционные нейронные сети дают более устойчивые результаты при классификации изображений, подвергнутых аффинным преобразованиям. Этого нельзя сказать про полносвязанные нейронные сети. Этот аспект подтверждается следующим экспериментом, проведенным автором.

Полносвязная ИНС была обучена на некоторой выборке термограмм. Затем эти термограммы были подвергнуты аффинным преобразованиям, в частности повороту на незначительный угол (5–10 градусов). При попытке классифицировать новые термограммы с помощью полносвязной ИНС было получено значительное уменьшение доли точных классификаций. В этом случае разница между количеством точных классификаций, выполненных конволюционной ИНС, и полносвязной сетью интерпретировалась как методическая погрешность влияния архитектуры, связанная с применением полносвязной ИНС для решения задач классификации термограмм.

Как отмечается в [4], при машинном обучении вид используемых данных так же важен, как и алгоритм, применяемый для их обобщения. Как известно, набор данных характеризуют понятием зашумленности [19]. В нашем случае под шумом понимается наличие какой-либо области в пространстве обучающей или тестовой выборки, где представлены образцы нескольких классов, неразделимых прямой (общем случае гиперплоскостью в n -мерном пространстве). Пример подобного шума изображен на рис. 4 для случая двумерного пространства. На данном рисунке каждой точке на диаграмме соответствует один элемент выборки данных. Случайные сигналы шума на термограммах могут быть исследованы с помощью методики оценки амплитудного спектра и корреляционных функций, описанной в работах [20, 21].

Расположение точки обуславливается значением атрибутов, характеризующих данный элемент выборки, а число измерений пространства соответствует числу атрибутов, которыми характеризуется каждый элемент. Двумерное пространство приведено в качестве примера, но аналогичное утверждение справедливо в общем случае для n -мерного пространства и разделяющей гиперплоскости.

Анализируя данные в выборке, можно определить долю образцов выборки, находящихся в подобных областях. Это позволяет приблизительно оценить порог точности работы ИНС, обученной на этой выборке, т. к. образцы, представляющие собой шум, скорее всего будут вносить ошибку в работу сети. Это служит основанием для приводимых далее формул, позволяющих выполнить приблизительную количественную оценку минимально возможной методической погрешности ИНС, обученной на рассматриваемой выборке.

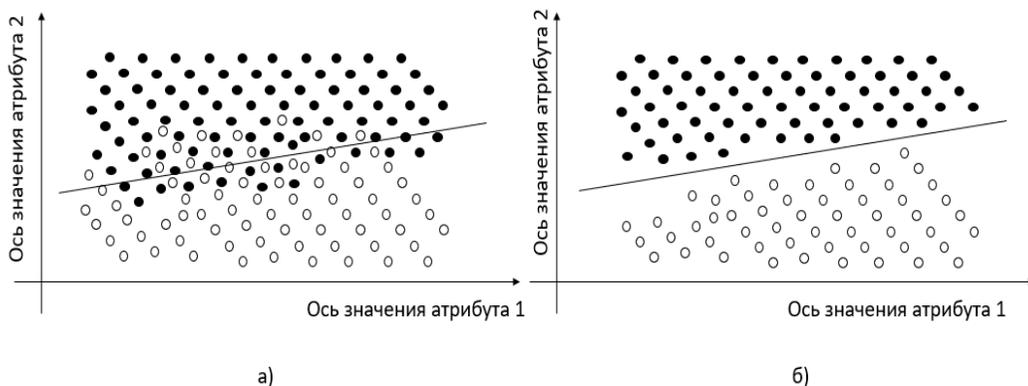


Рис. 4. Примеры распределения классифицируемых данных в пространстве обучающей или тестовой выборки:

- а) разделение классифицируемых данных с погрешностью;
 б) точное разделение классифицируемых данных

Для оценки выборки и выделения отдельных зашумленных областей применялся метод снижения размерности исследуемого признакового пространства Dimensionality reduction [19].

Оценка относительной методической погрешности δ_d , вызываемой зашумленностью данных, равна

$$\delta_d = \frac{N_m}{N},$$

где N_m – выделенное число элементов обучающей выборки, находящихся в зашумленной области;

N – общее число элементов обучающей выборки.

Методическая погрешность, вызываемая влиянием структуры ИНС и качеством обучения, может оцениваться разными способами. Как уже отмечалось выше, можно сопоставлять точность нейронной сети путем сравнения с точностью какой-либо широко известной сети. Так часто поступают на практике в публикациях, описывающих какую-либо новую ИНС [16, 18, 19].

Альтернативно можно выполнить сравнение доли ошибочных классификаций нейронной сети со значением зашумленности данных, полученных при их статистическом анализе. Заранее предполагается, что ИНС будет ошибочно классифицировать данные, принадлежащие зашумленной этой части выборки. Таким образом, получаем меру приближенности точности ИНС к максимально возможной на рассматриваемой выборке.

Суммарная методическая погрешность, вносимая структурой ИНС и качеством обучения, оценивается по формуле:

$$\delta_{ст} + \delta_{об} \leq \delta_T - \delta_d, \quad \delta_T > \delta_d,$$

где $\delta_{об}$ – методическая погрешность, вносимая качеством обучения ИНС;
 δ_T – погрешность ИНС, оцененная на тестовой выборке.

Если будет получено $\delta_T < \delta_d$, это может быть признаком допущенных ошибок в эксперименте. Например, тестовая выборка была составлена нерепрезентативно.

Относительная погрешность ИНС, оцененная на тестовой выборке, определяется из соотношения

$$\delta_T = \frac{P_e}{P},$$

где P_e – число ошибочно выполненных классификаций ИНС;
 P – суммарное число выполненных классификаций ИНС, равное числу элементов тестовой выборки.

Описанный подход был применен для оценки погрешности классификации отказов, выполняемой конволюционной ИНС при обработке термограмм электронного прибора.

Экспериментальные результаты

При экспериментальной проверке разработанной ТСТД использовалось следующее оборудование: тепловизор FLIR E6, имеющий основную погрешность 0,06 °С, многофункциональный прибор Metrel MI 6401Poly с погрешностью измерения температуры окружающей среды $\pm 0,2$ °С и цифровой осциллограф GDS 2104. Двухветвенная ИНС построена на основе архитектуры, описанной в работе [17], а также включает в себя некоторые эвристики, предложенные в работах [18, 23]. Программная реализация ИНС выполнена на языке С# и содержит конволюционную сеть с 8573 нейронами в трех конволюционных слоях главной ветви и полносвязную сеть с 6 нейронами в одном слое во вспомогательной ветви. Нейронная сеть обучалась на выборке из 250 термограмм в течение 300 эпох с темпом обучения 0,00005.

В описываемых экспериментах сравнение проводилось на обучающей выборке, составленной из модельных термограмм. Это связано с тем, что использование каких-либо термограмм, снятых с реальных приборов, невольно закладывало бы неявным образом особенности работы тех приборов, которые использовались при формировании данной обучающей выборки. Это не совсем корректно, т. к. различность, которая была зафиксирована в ходе экспериментов при работе даже двух приборов одной модели, не должна вносить свой вклад в обучение ИНС. Это послужило мотивацией для формирования обучающей выборки из модельных термограмм, полученных на основе математической модели распределения температуры по поверхности прибора, находящемся в том или ином состоянии (режим работоспособности или один из возможных отказов). Верификация таких модельных термограмм осуществлялась путем их сопоставления с реальными термограммами, снятыми с приборов.

Примеры термограмм контролируемого прибора приведены на рис. 5.

Методическая погрешность, обусловленная наличием шума в данных, равна нулю, поскольку построенные модельные термограммы в рассматриваемой задаче делимы гиперплоскостью и не содержат зашумленных областей. Это можно видеть на примере трех классов термограмм, соответствующих трем типам дефектов в приборе. Для трех классов термограмм на рис. 6 приведена диаграмма главных компонент PCA, а на рис. 7 – диаграмма, построенная методом многомерного шкалирования [22].

Погрешность ИНС на тестовой выборке составила 2 %, так как при проверке работоспособности ИНС было получено 98 % точных классификаций. С учетом инструментальной погрешности измерительных каналов, равной 0,5 %, общая погрешность диагностирования состояний с помощью ТСТД не превысила 2,5 %.

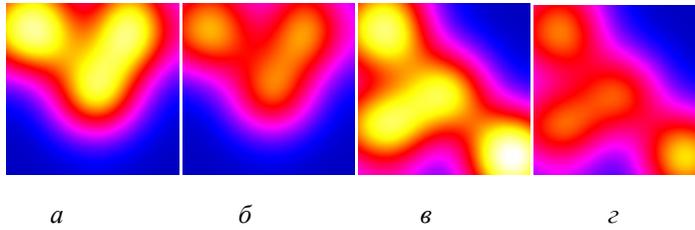


Рис. 5. Термограммы поверхности прибора при различных технических состояниях:
a, в – термограммы работоспособных состояний;
б, г – термограммы при неисправностях в приборе

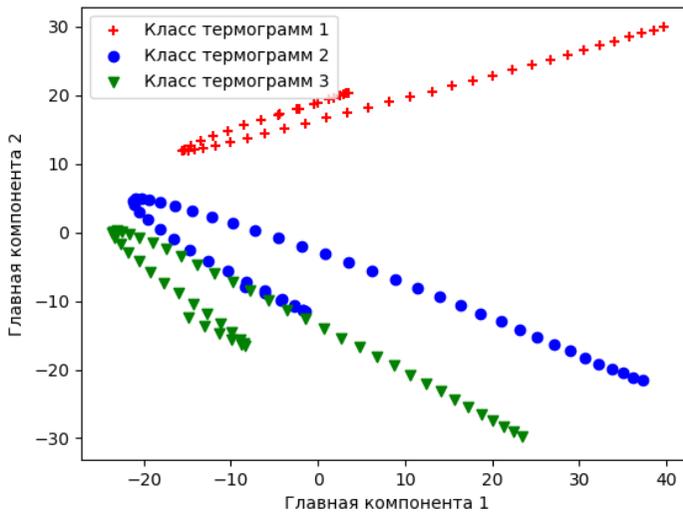


Рис. 6. Диаграмма главных компонент для трех классов термограмм

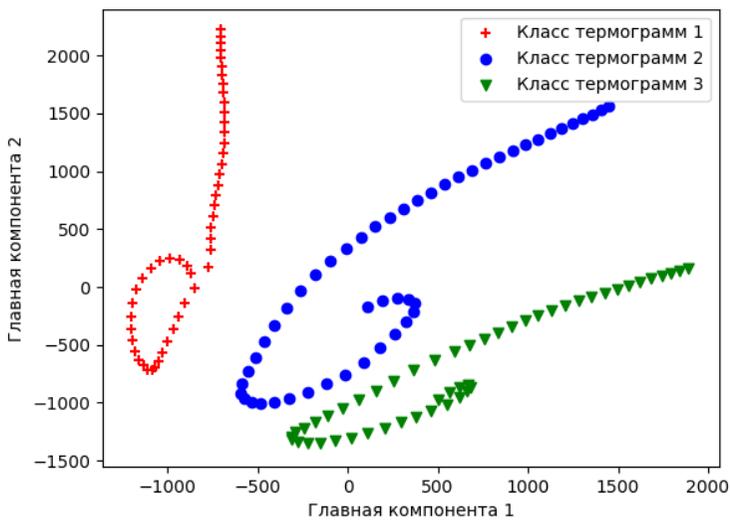


Рис. 7. Диаграмма, построенная методом многомерного шкалирования для трех классов термограмм

Заключение

Проведенный в статье метрологический анализ позволяет оценивать не только погрешности средств измерительной техники, но и методические погрешности, вносимые искусственной нейронной сетью в процесс контроля технических состояний объектов. Выполненная структуризация измерительных каналов позволила определить выражения для расчета аддитивных и мультипликативных погрешностей измерительных каналов ИИС. Предложена методика интерпретации методической погрешности ИИС и формулы для количественной оценки ее составляющих. Предложенные решения были апробированы в экспериментах по диагностированию с помощью ИИС микросхемы матрицы ПЗС в оптико-электронном преобразователе.

Данная методика контроля, основанная на термограммах объектов, может использоваться и в других приложениях, где необходимо классифицировать сложные образы технических состояний объектов при дистанционном контроле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селиванова З.М. Интеллектуализация информационно-измерительных систем неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых материалов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 184 с.
2. Харисова З.И. Информационно-измерительная система для гранулометрического анализа жидких дисперсных сред на основе видеотехнических средств и нейросетевых технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2018. – 21 с.
3. *Rassell S., Norvig P.* Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd Edition. – Pearson Education, 2010. – 1095 p.
4. Яхьяева Г. Нечеткие множества и нейронные сети. – М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2016. – 187 с.
5. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 400 с.
6. *Orlov S.P., Vasilchenko A.N.* Intelligent measuring system for testing and failure analysis of electronic devices // 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – IEEE Conference Publications. – 2016. – V. 1. – P. 401–403.
7. Орлов С.П., Гурин Р.В. Интеллектуализация контроля и диагностики электронных приборов на основе нейронных сетей // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018). Сборник докладов. – СПб.: СПб ГЭТУ «ЛЭТИ». – Т. 2. – 2018. – С. 99–102.
8. Орлов С.П., Гурин Р.В., Уютова О.Ю. Интеллектуализация информационно-измерительных систем контроля и диагностирования на основе нейросетевых технологий // Мягкие измерения и вычисления. – 2018. – Вып. 4. – С. 4–12.
9. ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Ч. 1. Общие методы. – М.: Стандартинформ, 2014. – 28 с.
10. ГОСТ Р ИСО 13372-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 21 с.
11. ГОСТ Р 8.596-2002. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 15 с.
12. МИ 222-80. Методика расчета метрологических характеристик измерительных каналов информационно-измерительных систем по метрологическим характеристикам компонентов. – М.: Издательство стандартов, 2005. – 24 с.
13. Шлыков Г.П. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. – 100 с.
14. Дружинина Л.В., Дружинин Д.Г. Анализ и классификация погрешностей обучения информационно-измерительных систем на базе нейронных сетей // Молодой ученый. – 2016. – № 21 (125). – С. 127–129.
15. *Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S.E., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabinovich A.* Going deeper with convolutions, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recog-

16. *Nielsen M.* Neural Networks and Deep Learning, free online book. 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com> (дата обращения – 27.09.2018).
17. *LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P.* Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 86. – Issue 11. – P. 2278–2324.
18. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.* ImageNet classification with deep convolutional neural networks // NIPS'12 Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2012, Vol. 1. p. 1097–1105.
19. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville Y.* Deep learning [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.deeplearningbook.org> (дата обращения – 25.09.2018).
20. *Якимов В.Н., Горбачев О.В.* Программно-аппаратное обеспечение системы оценки амплитудного спектра многокомпонентных процессов // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 5. – С. 49–55.
21. *Якимов В.Н., Машков А.В.* Цифровое оценивание моментов корреляционной функции на основе знакового аналого-стохастического квантования случайного процесса // Измерительная техника. – 2016. – № 1. – С. 11–13.
22. *Айвазян С.А., Мхитарян В.С.* Прикладная статистика. Основы эконометрики: 2-е изд. – М.: Юнити, 2001. – 656 с.
23. *Nair V., Hinton G.* Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines // Proceedings of ICML. – 2010. – V. 27. – P. 807–814.

Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.

ANALYSIS OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE THERMOVISION TECHNICAL DIAGNOSIS SYSTEM CONTAINING A NEURAL NETWORK

R.V. Girin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper deals with the problem of determining the errors of the thermovision system of the electronic devices technical diagnostics using a neural network. The structure of the system is described, including measuring channels with a thermal imager, an external thermometer, a block of computational models of thermal states, a knowledge base and a software neural network thermogram analyzer. It is proposed to use for the analysis of device states the two-branch network consisting of the multilayer convolutional neural network and the fully connected network. A metrological model of measuring channels has been built. A classification of the components of the instrumental error is given and expressions for the multiplicative and additive components of the instrumental error are obtained. Particular attention is paid to the analysis of the methodological error caused by the use of an artificial neural network in the classification of failures in the device. Experimental studies were performed that confirmed the effectiveness of the proposed methodological and technical solutions.*

Keywords: *artificial neural networks, error analysis, technical diagnostics, thermal imager, infrared thermography.*

REFERENCES

1. *Selivanova Z.M.* Intellectualization of information-measuring systems for non-destructive testing of the thermophysical properties of solid materials . – M.: Mashinostroenie Publ., 2006. – 184 p.
2. *Kharisova Z.I.* Information-measuring system for granulometric analysis of liquid dispersion substances based on video equipment and neural network technologies: avtoref. diss. kand. techn. sci. ence. Ufa, 2018. – 21 p.
3. *Russell S., Norvig P.* Artificial intelligence: A Modern Approach, 3rd Edition. – Pearson Education, 2010. – 1095 p.
4. *Iakhieiaeva G.* Fuzzy sets and neural networks. – M.: INTUIT, 2016. – 187 p.
5. *Komartsova L.G., Maksimov A.V.* Neurocomputers. – M.: MGTU im. N.E Bauman, 2004. – 400 p.
6. *Orlov S.P., Vasilchenko A.N.* Intelligent measuring system for testing and failure analysis of electronic devices // 2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). – IEEE Conference Publications. – 2016. – V. 1. – P. 401–403.
7. *Orlov S.P., Girin R.V.* Intellectualization to failure analysis and diagnostics of electronic devices using neural networks // Proc. XXI International conf. SCM'2018. – Saint-Petersburg: SPbGTU 'LETI'. – V. 2. – 2018. – P. 99–102.
8. *Orlov S.P., Girin R.V., Uyutova O.Yu.* Intellectualization of information-measuring systems for monitoring and diagnostics based on neural network technologies // Soft Measurements and Computing. – 2018. – V. 4. – P. 4–12.
9. GOST R ISO 18434-1-2013. Condition monitoring and diagnostics of machines. Thermography. Part 1. General methods. – M.: Standartinform, 2014. – 28 p.
10. GOST R ISO 13372. Condition monitoring and diagnostics of machines. Terms and Definitions. – M.: Standartinform, 2014. – 21 p.
11. GOST 8.596-2002. State system for ensuring the uniformity of measurements (GSI). Metrological assurance of measuring systems. The main provisions. – M.: Izdatelstvo standartov, 2002.
12. MI 222-80. The technique of calculating the metrological characteristics of measuring channels of information-measuring systems using the metrological characteristics of the components. – M.: Izdatelstvo standartov, 2005.
13. *Shlykov G.P.* Measurement theory: equations, models, accuracy estimation. – Penza, Izdatelstvo PGU, 2008. – 100 p.
14. *Druzhinina L.V., Druzhinin D.G.* Analysis and classification of learning errors of information-measuring systems based on neural networks // Young Scientist. – 2016. – V. 21(125). – P. 127–129.
15. *Szegedy C., Liu W., Jia Y., Sermanet P., Reed S.E., Anguelov D., Erhan D., Vanhoucke V., Rabino-vich A.* Going deeper with convolutions // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2015. – P. 1–9.
16. *Nielsen M.* Neural Networks and Deep Learning, free online book. 2017. – URL: <http://neuralnetworksanddeeplearning.com>
17. *LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P.* Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Vol. 86. – Issue 11. – P. 2278–2324.
18. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.* ImageNet classification with deep convolutional neural networks // NIPS'12 Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems. 2012, Vol. 1. p. 1097–1105.
19. *Goodfellow I., Bengio Y., Courville Y.* Deep learning. – URL: <http://www.deeplearningbook.org/>
20. *Iakimov V.N., Gorbachev O.V.* Software and hardware system for estimating the amplitude spectrum of multicomponent processes // Instruments and Experimental Technique. – 2013. – № 5. – P. 49–55.
21. *Iakimov V.N., Mashkov A.V.* Digital estimation of the moments of the correlation function based on the sign analogue-stochastic quantization of a random process // Measuring Technique. – 2016. – № 1. – P. 11–13.
22. *Ivazian S.A., Mkhitarian V.S.* Probability theory and applied statistics. Basics of econometrics. 2^d edit. – M.: Uniti, 2001. – 656 p.
23. *Nair V., Hinton G.* Rectified linear units improve restricted Boltzmann machines // Proceedings of ICML. – 2010. – V. 27. – P. 807–814.

УДК 53.088.7, 681.2.088

МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ СИГНАЛА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ СКАНИРУЮЩЕМ КАЛОРИМЕТРЕ*

А.С. Нечаев, А.П. Жирнова, И.Н. Нечаева

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Приведен анализ использующихся в дифференциальных сканирующих калориметрах (ДСК) способов восстановления локальных во времени информационных сигналов и сделан выбор на вейвлет-функциях. На основании выбранного материнского вейвлета была предложена методика аппроксимации экспериментально полученных с помощью устройства ДСК сигналов. Была проведена апробация методики для однопикового и двухпикового сигналов. При наличии возможности изменять параметры аппроксимирующей функции в процессе математического описания сигнала была доказана возможность использования методики для работы с веществами, обладающими эндо- и экзотермическими свойствами в момент фазового перехода. Были даны оценки влияния результатов оцифровки сигналов на точность измеряемой дифференциальной температуры. В результате была оценена относительная погрешность аппроксимирующей функцией при использовании предложенной методики от числа проделанных итерационных вычислений.

Ключевые слова: дифференциальный сканирующий калориметр, аппроксимация, вейвлет-функция, погрешность, однопиковый сигнал, многопиковый сигнал.

Введение

В задачах изучения физико-химических параметров веществ методом дифференциального термического анализа (ДТА) используются измерительные системы, фиксирующие полученные результаты после их автоматизированной обработки. В процессе автоматизированной обработки экспериментальных данных проводится их аппроксимация. Эта операция позволяет сглаживать погрешности эксперимента, вызванные небольшими случайными отклонениями измеряемой величины, описывать набор данных функциями, которые возможно использовать при повторении эксперимента в одних и тех же условиях, а также использовать довольно компактную математическую запись сигнала при значительном объеме исходных данных по сравнению с операцией интерполяции. Одним из распространенных измерительных приборов в ДТА является дифференциальный сканирующий калориметр (ДСК), предназначенный для определения температур фазовых переходов индивидуальных веществ и многокомпонентных смесей, а также для получения основных термодинамических и кинетических параметров исследуемых материалов.

* Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-01103 а.

Нечаев Александр Сергеевич (к.т.н.), доцент кафедры «Радиотехнические устройства».

Жирнова Елена Павловна, магистрант.

Нечаева Ирина Николаевна, аспирант.

Уменьшение погрешностей измерения ставится ключевой задачей при проектировании и создании ДСК. При этом совершенствуется конструкция блоков устройства, используются новые материалы при изготовлении элементов, вводятся системы автоматического управления тепловыми потоками, способные поддерживать необходимый режим нагрева образцов в условиях внешних возмущений, и т. д. [1, 2]. Однако аппаратные решения повышения точности измерения часто либо не позволяют избавиться от возникающих погрешностей в необходимой мере, либо являются сложными и нерентабельными в своем практическом исполнении. Это приводит к необходимости применять аналитические методы повышения точности измерения, которые заключаются в использовании усовершенствованных математических моделей блоков информационно-измерительной системы и происходящих в них процессов [3].

Обработка сигналов в ДСК аналитическими методами является неотъемлемой частью проведения эксперимента, поскольку она позволяет исключить некоторые погрешности измерения, в частности инструментальную и динамическую, которые вносят весомый вклад в результаты опыта [4, 5].

Выбор базисной функции для анализа экспериментальных данных является важной задачей, решение которой сказывается на эффективности использования результатов в дальнейшей обработке восстановления информационного сигнала и точности полученных вследствие этого выводов. Так, например, в задачах восстановления исходного сигнала могут быть использованы обратные фильтры [6, 7], среди которых особо выделяют нерекурсивные, рекурсивные, фильтр Калмана и адаптивные фильтры, а также вытянутые сферические волновые функции [8] и нейросетевые модели [9]. Принцип большинства имеющихся методов основан на знании как функций, отражающих характеристики измерительных элементов при различных режимах работы системы, так и функций, аппроксимирующих выходной сигнал.

Постановка задачи

Целью работы является разработка методики аппроксимации сигнала в дифференциальном сканирующем калориметре, позволяющей использовать имеющуюся в нем программно-аппаратную базу.

Для достижения цели ставится задача анализа базисных функций, способных с приемлемой точностью аппроксимировать широкополосный сигнал, полученный в ходе проведения эксперимента на устройстве ДСК. По результатам проведенного исследования следует разработать методику использования выбранных базисов для аппроксимации полученного в ходе эксперимента сигнала. Причем при создании методики следует опираться на уже имеющиеся в современных устройствах ДСК программные и аппаратные возможности.

Под аппаратными возможностями понимается оцифровка сигнала, которая, во-первых, представляет исходный сигнал в виде ряда дискретных значений, а во-вторых, вносит дополнительную погрешность в ходе аналого-цифрового преобразования сигнала.

Возможности программной части информационно-измерительных систем рассматриваемого класса весьма широки, поскольку большинство из них сопряжены с работой ЭВМ. Однако быстроедействие процесса аппроксимации сигнала не должно вести к существенной задержке получения результатов всего эксперимента, а следовательно, от предлагаемой методики требуется относительно небольшое число итерационных вычислений.

Методы решения

Особенностью сигналов, полученных в ходе исследования тепловых характеристик веществ с помощью ДСК, является их локальность во времени. Это приводит к появлению существенной расчетной погрешности при использовании популярных в измерительной технике спектральных методов обработки исходных данных.

В настоящее время широкое распространение получил вейвлет-анализ нестационарных сигналов, который позволяет представить конечный во времени сигнал с помощью базисных функций, существующих постоянно, но не равных нулю на ограниченном временном промежутке [10–12].

В ходе работы были проанализированы различные виды материнских вейвлетов, которые позволяют провести анализ полученных в ходе эксперимента сигналов, среди них DOG-вейвлет, WAVE-вейвлет, вейвлет Морле, «мексиканская шляпа» и др. Каждый из них является плавной функцией с нулевым моментом и быстро убывающей с ростом частоты [13–15], что важно при анализе экспериментально полученных данных.

Для дальнейших исследований был выбран вейвлет гауссовского типа, имеющий математическую запись

$$\psi = A \cdot \exp\left(\frac{-(t-b)^2}{2a^2}\right), \quad (1)$$

где функция $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ называется вейвлетом;

A – параметр, характеризующий максимальное значение вейвлета;
 a , b – параметры масштаба и сдвига соответственно.

Данный материнский вейвлет подходит для описания сигналов рассматриваемых типов аналитических приборов, что подтверждается в исследованиях [16], а также имеет один набор параметров масштаба и сдвига, в отличие, например, от DOG-вейвлета или вейвлета типа «мексиканская шляпа».

Сигнал на выходе аналитического прибора представляет собой конечную сумму вейвлет-функций [17, 18]:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \exp\left(\frac{-(t-b_i)^2}{2a_i^2}\right), \quad (2)$$

где i – порядковый номер базовой функции, $i = 1, 2, \dots, N$.

Такой принцип суперпозиции вейвлетов позволяет применить последовательный подход к нахождению аппроксимирующей функции.

Для определения функции первого вейвлета выражения (2) необходимо найти значения его параметров. Временной параметр сдвига пика b_i и его максимальное значение A_i довольно просто определяются из массива данных, полученных в ходе проведения эксперимента на устройстве ДСК, имеющем блок оцифровки сигналов. На рис. 1 параметры b_i и A_i определяют абсциссу и ординату точки экстремума пика относительно базовой линии соответственно. Погрешность полученных значений элементов массива определяется разрядностью аналого-цифрового преобразователя и в большинстве случаев является несущественной, поскольку скорость происходящих в ДСК тепловых процессов значи-

тельно ниже быстродействия преобразователя [19–21]. Например, в отечественном дифференциальном сканирующем калориметре ДСК-500 используется прецизионный 24-разрядный аналогово-цифровой преобразователь – максимальное значение интегральной нелинейности 0,0015 %, а число эффективных разрядов при выбранной частоте преобразования равно 19, что позволяет получать исходные данные с довольно высокой точностью. Таким образом, уравнение (2) можно представить в дискретном виде:

$$S[j] = \sum_{j=0}^M \sum_{i=1}^N A_i \cdot \exp\left(\frac{-(t[j] - b_i)^2}{2a_i^2}\right), \quad (3)$$

где j – номер элемента массива данных, $j = 1, 2, \dots, M$.

Расчет масштабного коэффициента a_i осуществляется с помощью ввода вспомогательных коэффициентов по формуле

$$a_i = \sqrt{\frac{-(d - b_i)^2}{2 \cdot \ln\left(\left(\frac{c - const}{A_i}\right)\right)}}. \quad (4)$$

Здесь c и d – соответственно значения дифференциальной температуры и временной координаты массива данных в точке, максимально близкой к расчетному значению g , которое определяется как $g = A_i \exp(-0,5) + const$, где $const$ – калибровочное значение дифференциальной температуры.

Подставив значение уравнения (4) в (3) при $i=1$, получим выражение для первого вейвлета.

Следующим шагом вычисляется разность имеющегося набора массива данных, характеризующего экспериментально снятую дифференциальную температуру $\Delta T[j]$, и полученного массива (3):

$$q[j] = \Delta T[j] - S[j]. \quad (5)$$

Если максимальное абсолютное значение $q[j]$ больше заданного порога, определяемого максимально допустимой погрешностью, то за основу следующего цикла вместо ряда (3) принимается (5) и по описанному алгоритму вычисляется $S[j]$ при $i = 2$ и т. д. Окончание вычислений наступает при выполнении условия $q[j] \leq \varepsilon$, где ε – заданная погрешность, а за аппроксимирующую функцию принимают сумму всех полученных вейвлетов $S[j]$.

В работе использование разработанной методики описания выходного сигнала калориметра с помощью вейвлет-функций было осуществлено для простого однокомпонентного вещества индия (см. рис. 1). На оси ординат отражены дискретные значения дифференциальной температуры в безразмерном виде с учетом калибровки измерительного устройства. Следует отметить, что исследование температур фазовых превращений веществ осуществляется на ДСК преимущественно под воздействием линейно изменяющегося температурного поля, скорость изменения которого задается блоком управления. От скорости нагрева зависят время проведения эксперимента, значение зафиксированной температуры фазового перехода и т. п. Задание оптимальной скорости нагрева опирается на

знание индивидуальных особенностей исследуемых веществ (молекулярной структуры, теплопроводности, массы и габаритов образца, эффективной площади контакта вещества с нагретой поверхностью и т. д.), что зачастую заранее неизвестно. Линейность изменения температуры нагрева позволяет применять довольно простые способы корректировки базовой линии для определенного эталонного образца, фиксировать кривую теплопоглощения в процессе нагрева измерительного блока и находить кинетические характеристики при динамическом режиме работы системы.

Постоянство скорости нагрева дает возможность использовать в качестве аргумента аппроксимирующей функции как время, так и температуру нагрева измерительной ячейки.

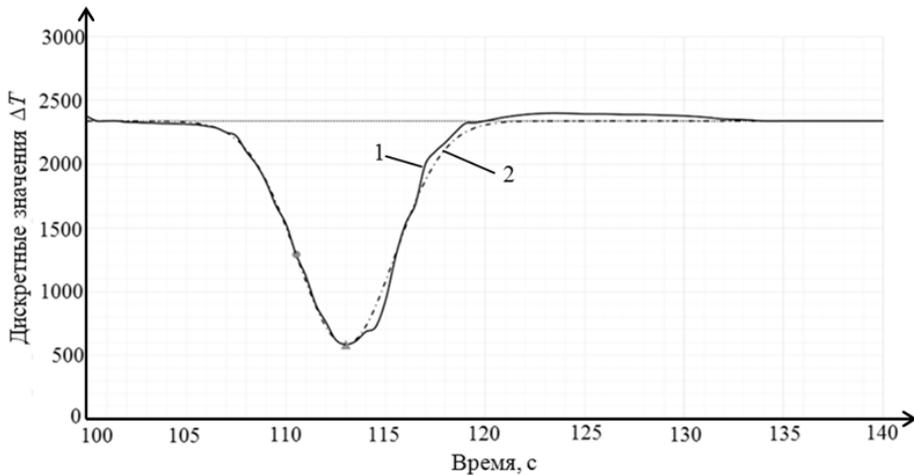


Рис. 1. Термограмма индия (1) и первая вейвлет-функция (2)

На рис. 1 сплошной линией изображена экспериментально снятая термограмма индия, на которой выделены две точки: вершина пика ($b_1 = 113 \text{ с}$, $A_1 = -1755$) и точка, максимально близкая к рассчитанному значению g , с координатами $d_1 = 110,5 \text{ с}$, $c_1 = -1293$. С помощью уравнений (3) и (4) была рассчитана первая вейвлет-функция, отображенная на рисунке пунктирной линией. Разность экспериментально снятого сигнала и рассчитанного вейвлета приведена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что получившаяся зависимость является локальным многоимпульсным сигналом, а значит, к нему можно применить тот же подход, получая новые значения функций $S[j]$ при $i = 2, 3$, и т. д., шаг за шагом уменьшая погрешность.

Довольно часто экспериментатору необходимо знать не только абсолютные значения погрешности, но и нормированные. С этой целью используется понятие относительной погрешности, которую в интерпретации поставленной задачи можно представить следующим отношением:

$$z[j] = \left| \frac{\Delta T[j] - S[j]}{\Delta T[j]} \right| \cdot 100\%. \quad (6)$$

Вышеуказанные погрешности рассчитываются для ряда значений T , по-

этому они тоже записываются как ряд значений. В этом случае расчет аппроксимирующих вейвлет-функций завершается при уменьшении максимального значения $z[j]$ ниже заданной погрешности.

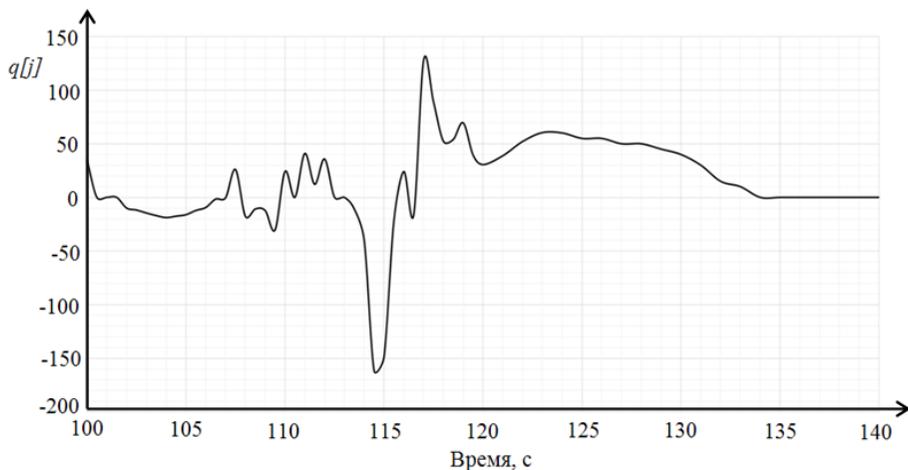


Рис. 2. Разность между исходными данными и рассчитанной вейвлет-функцией

Для индия был произведен расчет ряда вейвлет-функций по предложенной методике и оценена относительная погрешность аппроксимации исходного сигнала. Результаты представлены на рис. 3.

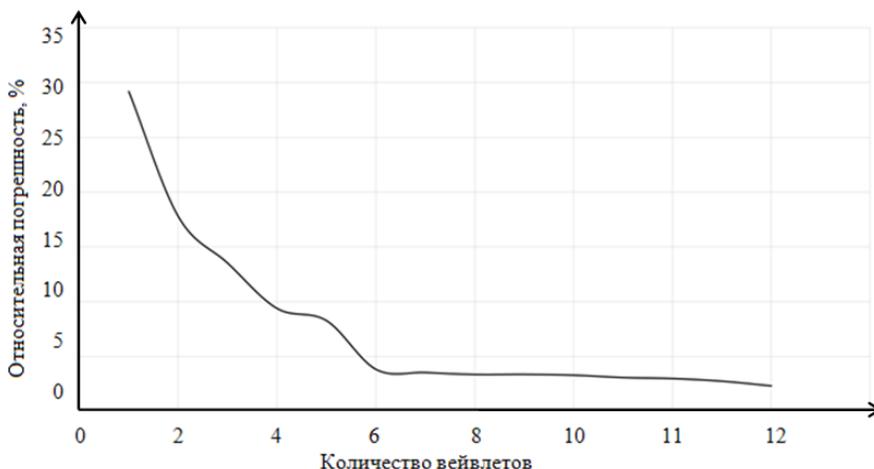


Рис. 3. Зависимость максимальной относительной погрешности от числа аппроксимирующих сигнал вейвлет-функций

Как видно из рис. 3, относительная погрешность довольно быстро уменьшается до шестого цикла расчетов вейвлет-функций с 30 до 3,5 %. Сумма двенадцати вейвлет-функций дает погрешность 2,3 %, что говорит о дальнейшем уменьшении погрешности при увеличении слагаемых выражения (3), однако после шестого скорость уменьшения погрешности значительно ниже.

По предложенной выше методике была произведена аппроксимация двухпикового сигнала, отражающего фазовое превращение тринитроэтилового эфира

тринитромасляной кислоты при воздействии линейно нарастающей температуры (рис. 4).

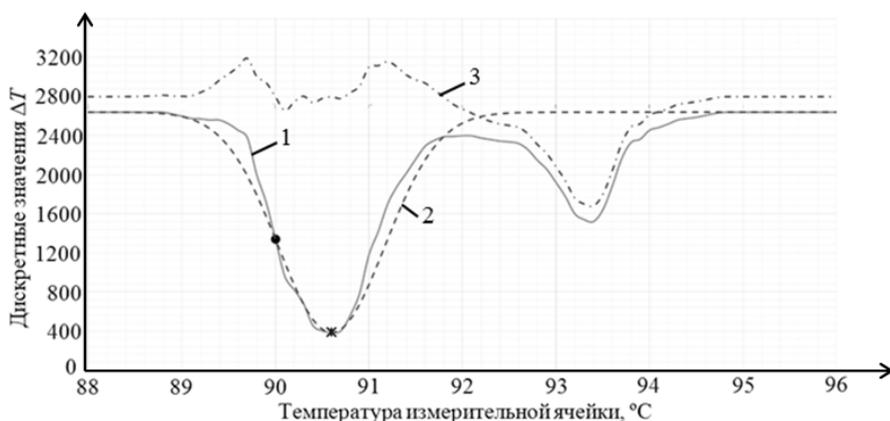


Рис. 4. Аппроксимация двухпикового сигнала:

1 – экспериментально снятая термограмма разложения тринитроэтилового эфира тринитромасляной кислоты; 2 – первая аппроксимирующая вейвлет-функция; 3 – разность между исходными данными и рассчитанной вейвлет-функцией

По формуле (6) произведена оценка относительной погрешности $z[j]$ при первом цикле аппроксимации, которая составила 90 %. При уменьшении полученной разности аналогично приведенному примеру при однопиковом сигнале была определена зависимость изменения $z[j]$ от количества аппроксимирующих сигнал вейвлет-функций (рис. 5).

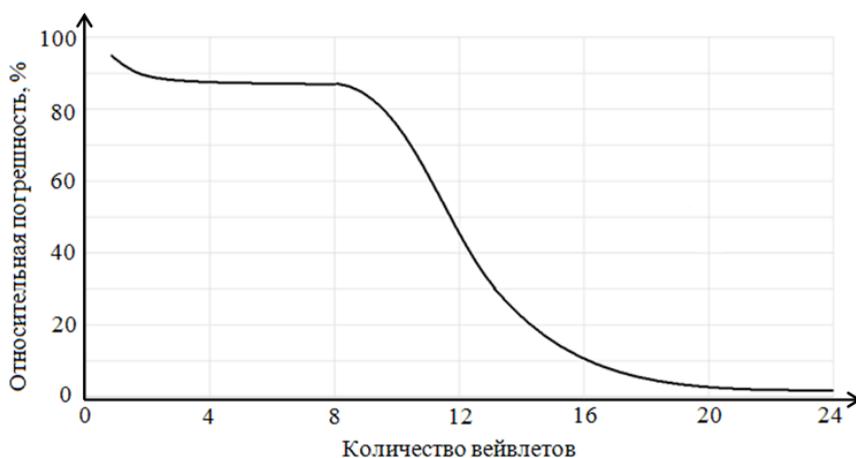


Рис. 5. График зависимости относительной погрешности аппроксимации от количества вейвлет-функций

Как видно из рис. 5, относительная погрешность при определенном количестве итераций (от 2 до 8) не изменяет своего значения. Это объясняется последовательным подходом нахождения аппроксимирующей функции, который связан с уменьшением ближайшего пика к начальному значению разностной функции до заданной погрешности. Так, в ходе апробации метода за допустимую от-

носительную погрешность принималось значение 3 % и в течение 8 итераций производилось разложение первого пика двухпикового сигнала, приведенного на рис. 4. Описанием первого пика 8 вейвлет-функциями была достигнута допустимая погрешность и началась аппроксимация второго пика. Такой метод описания более прост с точки зрения его алгоритмизации, но в то же время не влияет на качество конечной модели, поскольку описание сигнала представляет собой сумму вейвлетов, а значит, порядок нахождения базисных функций неважен.

Выводы

Разработанная методика, как было показано выше, позволяет работать как с однопиковыми, так и многопиковыми сигналами. Причем учитывая возможность параметра A в выражении (1) принимать как положительные, так и отрицательные значения, можно сделать вывод о том, что методика позволяет описывать пиковые сигналы как с положительными скачками, так и с отрицательными. С точки зрения физико-химического анализа веществ это возможно, когда в процессе эксперимента происходят экзо- и эндотермические реакции, что расширяет возможность применения предложенного метода аппроксимации сигналов в устройствах ДСК.

Данный принцип может лечь в основу алгоритма восстановления информационного сигнала аналитическими методами, используемыми в вычислениях аппроксимирующую функцию экспериментально полученных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мощенский Ю.В., Дмитриева Е.А., Нечаев А.С.* Задатчик программного нагрева для исследования термического поведения энергонасыщенных материалов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2016. – Ч. 5. – С. 19–22.
2. *Нечаев А.С., Хуснутдинова Р.Р., Нечаева И.Н., Дмитриева Е.А., Митрошин В.Н.* Модель корректирующего звена для уменьшения динамической погрешности измерительной ячейки дифференциального сканирующего калориметра // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 3 (51). – С. 73–77.
3. *Нечаев А.С., Мощенский Ю.В., Хуснутдинова Р.Р., Дмитриева Е.А.* Модель измерительного блока ДСК для синтеза системы управления тепловым потоком // Датчики и системы. – 2016. – № 6. – С. 38–43.
4. *Choin'ski D., Wodolazski A., Stachan'czyk D., Niedz'wiedz M.* Analysis of the thermal properties of a heat flow chip calorimeter using CFD // Applied Thermal Engineering. Vol. 96. 2016. P. 508–518.
5. *Koci V., Madera Y., Jerman M., Cerny R.* Computational analysis of heat transport and storage processes in large-volume isothermal heat flow calorimeter // Applied Thermal Engineering. Vol. 121. 2017. P. 547–553.
6. *Засов В.А., Тарабардин М.А., Никоноров Е.Н.* Алгоритмы и устройства для идентификации входных сигналов в задачах контроля и диагностики динамических объектов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – № 2. – С. 115–123.
7. *Tsai J., Ebrahimzadeh F., Hsu W., Tann J.W., Guo Sh., Shieh L., Canelon J.I., Wang L.* Modeling and tracker for unknown nonlinear stochastic delay systems with positive input constraints // Applied Mathematical Modelling. Vol. 40. 2016. P. 10447–10479.
8. *Zou C., Kou K.I.* Robust signal recovery using the prolate spherical wave functions and maximum correntropy criterion // Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 104. 2018. P. 279–289.
9. *Волосников А.С.* Нейросетевая динамическая измерительная система с дополнительной фильтрацией последовательно восстанавливаемого входного сигнала датчика // Известия Челябинского научного центра УРО РАН. – 2005. – № 4. – С. 139–144.
10. *Воробьев В.И., Грибунин В.Г.* Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб: ВУС, 1999. – 204 с.
11. *Zhang B., Wang D., Ye Y.* Wavelet transform-based frequency tuning ILC // IEEE Transactions on systems, man and Cybernetics. Part B, 35(1), 2005. P. 107–114.
12. *Wang Y., Kwon S., Rgan A., Rohlev T.* System identification of the linac RF system using a wavelet

- method and its applications in the SNS LLRF control system // Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001. P. 1613–1615.
13. *Shahbaztabar D., Alirezadee Sh., Ahmadi M., Heydari R.* A MC-CDMA system based on orthogonal filter banks of wavelet transforms and partial combining // *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*. Vol. 94. 2018. P. 128–138.
 14. *Chui C.K., Villiers J., Zhuang X.* Multirate systems with shortest spline-wavelet filters // *Appl. Comput. Harmon. Anal.* Vol. 41. 2016. P. 266–296.
 15. *Lu Sh., Yu H., Dong H., Wang X., Sun Y.* Single-step prediction method of burning zone temperature based on real-time wavelet filtering and KELM // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 70. 2018. P. 142–148.
 16. *Сайфуллин Р.Т., Наумов А.А.* Вейвлет-анализ в обработке сигналов аналитических приборов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2016. – Т. 18, № 1(2). – С. 412–415.
 17. *Русинов Л.А.* Автоматизация аналитических систем определения состава и качества веществ. – Л.: Химия, 1984. – 160 с.
 18. *Манойлов В.В., Новиков Л.В.* Получение и обработка информации аналитических приборов. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 176 с.
 19. *Zhu X., Wang X., Xu Z., Li B.* Analysis on the selection of optimal ADC parameters in indirect measurement // *Infrared Physics & Technology*. Vol. 71. 2015. P. 501–505.
 20. *Wijayasundara G.W.C., Lee H., Park S. Cho H., Kim M.* Linearity evaluation of high-speed sampling ADC board // *Measurement*. Vol. 106. 2017. P. 31–34.
 21. *Cheng X., Zeng X., Feng Q.* Analysis and improvement of ramp gain error in single-ramp single-slope ADCs for CMOS image sensors // *Microelectronics Journal*. Vol. 58. 2016. P. 23–31.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2018 г.

METHOD OF SIGNAL APPROXIMATION IN DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETER

A.S. Nechaev, A.P. Zhirnova, I.N. Nechaeva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper analyzes the methods of reconstructing time-local information signals used in differential scanning calorimeters (DSC) and makes a choice on wavelet functions. Based on the selected maternal wavelet, a technique was proposed for approximating the signals obtained experimentally with a DSC device. Approbation of the technique for single-peak and two-peak signals was carried out. Having the possibility to change the parameters of the approximating function in the course of the mathematical description of the signal, the possibility of using the technique for working with substances possessing endo- and exothermic properties at the time of the phase transition was proved. Evaluations of the effect of digitizing the signals on the accuracy of the measured differential temperature were given. As a result, the relative error was estimated by the approximating function when using the proposed technique from the number of iterative calculations performed.*

Keywords: *differential scanning calorimeter, approximation, wavelet-function, error, single-peak signal, multi-peak signal.*

*Alexander S. Nechaev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Alena P. Zhirnova, Graduate Student.
Irina N. Nechaeva, Postgraduate Student.*

REFERENCES

1. *Moshchenskiy Yu.V., Dmitrieva E.A., Nechaev A.S.* Programmable heating programmer for studying the thermal behavior of energy-saturated materials // *Industrial Automated Control Systems and Controllers*. Vol. 5. 2016. p. 19–22. (In Russian).
2. *Nechaev A.S., Khusnutdinova R.R., Nechaeva I.N., Dmitrieva E.A., Mitroshin V.N.* Model of the correcting link for reducing the dynamic error of the measuring cell of the differential scanning calorimeter // *Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences"*. № 3 (51). 2016. P. 73–77. (In Russian).
3. *Nechaev A.S., Moshchenskiy Yu.V., Khusnutdinova R.R., Dmitrieva E.A.* Model of the DSC measuring unit for the synthesis of a heat flow control system // *Sensors and systems*. № 6. 2016. P. 38–43. (In Russian).
4. *Choin'ski D., Wodolazski A., Stachan'czyk D., Niedz'wiedz M.* Analysis of the thermal properties of a heat flow chip calorimeter using CFD // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 96. 2016. P. 508–518.
5. *Koci V., Madera Y., Jerman M., Cerny R.* Computational analysis of heat transport and storage processes in large-volume isothermal heat flow calorimeter // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 121. 2017. P. 547–553.
6. *Zasov V.A., Tarabardin M.A., Nikonov E.N.* Algorithms and devices for identifying input signals in problems of control and diagnostics of dynamic objects // *Vestnik SGAU. Samara*. 2009. № 2. P. 115–123. (In Russian).
7. *Tsai J., Ebrahimzadeh F., Hsu W., Tann J.W., Guo Sh., Shieh L., Canelon J.I., Wang L.* Modeling and tracker for unknown nonlinear stochastic delay systems with positive input constraints // *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 40. 2016. P. 10447–10479.
8. *Zou C., Kou K.I.* Robust signal recovery using the prolate spherical wave functions and maximum correntropy criterion // *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 104. 2018. P. 279–289.
9. *Volosnikov A.S.* Neural network dynamic measuring system with additional filtering of the successively restored sensor input signal // *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. № 4. 2005. P. 139–144. (In Russian).
10. *Vorobyov V.I., Gribunin V.G.* Theory and practice of wavelet transform. SPb: VUS, 1999. 204 p. (In Russian).
11. *Zhang B., Wang D., Ye Y.* Wavelet transform-based frequency tuning ILC // *IEEE Transactions on systems, man and Cybernetics. Part B*, 35(1), 2005. P. 107–114.
12. *Wang Y., Kwon S., Rgan A., Rohlev T.* System identification of the linac RF system using a wavelet method and its applications in the SNS LLRF control system // *Proceedings of the Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001*. P. 1613–1615.
13. *Shahbazzadeh D., Alirezadeh Sh., Ahmadi M., Heydari R.* A MC-CDMA system based on orthogonal filter banks of wavelet transforms and partial combining // *Int. J. Electron. Commun. (AEÜ)*. Vol. 94. 2018. P. 128–138.
14. *Chui C.K., Villiers J., Zhuang X.* Multirate systems with shortest spline-wavelet filters // *Appl. Comput. Harmon. Anal.* Vol. 41. 2016. P. 266–296.
15. *Lu Sh., Yu H., Dong H., Wang X., Sun Y.* Single-step prediction method of burning zone temperature based on real-time wavelet filtering and KELM // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. Vol. 70. 2018. P. 142–148.
16. *Sayfulin R.T., Naumov A.A.* Wavelet analysis in signal processing of analytical devices // *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. T. 18, № 1(2). 2016. P. 412–415. (In Russian).
17. *Rusinov L.A.* Automation of analytical systems for determining the composition and quality of substances. L.: Chemistry, 1984. 160 p. (In Russian).
18. *Manoylov V.V., Novikov L.V.* Reception and processing of information of analytical instruments. SPB: University of ITMO, 2014. – 176 p. (In Russian).
19. *Zhu X., Wang X., Xu Z., Li B.* Analysis on the selection of optimal ADC parameters in indirect measurement // *Infrared Physics & Technology*. Vol. 71. 2015. P. 501–505.
20. *Wijayasundara G.W.C., Lee H., Park S., Cho H., Kim M.* Linearity evaluation of high-speed sampling ADC board // *Measurement*. Vol. 106. 2017. P. 31–34.
21. *Cheng X., Zeng X., Feng Q.* Analysis and improvement of ramp gain error in single-ramp single-slope ADCs for CMOS image sensors // *Microelectronics Journal*. Vol. 58. 2016. P. 23–31.

УДК 621.317

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РОТАЦИОННЫМ ВИСКОЗИМЕТРОМ ТИПА ВРЦ**О.Г. Корганова, В.А. Кузнецов**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Для определения вязкости при заданной температуре используются вискозиметры различных типов, чаще всего ротационные. Эти вискозиметры нуждаются в стабилизации частоты вращения измерительного ротора и применении термостатов, так как вязкость сильно зависит от температуры. Предлагается метод измерения вязкости, лишенный этих недостатков. Вискозиметр содержит два канала: канал измерения вязкости и канал измерения температуры. Вращение измерительного ротора осуществляется приводом через калиброванную пружину, угол закручивания которой пропорционален крутящему моменту и преобразуется в широтно-импульсный сигнал. Микроконтроллер производит анализ и измерение ШИМ-сигнала и напряжения, пропорционального температуре, преобразует их в цифровой код, выдает результаты на дисплей и через порт выводит информацию о вязкости и температуре в цифровом виде. Предложенный алгоритм обработки измерительной информации исключает необходимость в стабилизации частоты вращения измерительного ротора.

Ключевые слова: вязкость, ротационный метод измерения, микроконтроллер, повышение точности измерения.

Технология производства некоторых видов продукции связана с необходимостью измерения динамической вязкости, являющейся или промежуточным, или конечным параметром этой продукции. Во многих случаях значение вязкости определяет и качество продукции.

Большинство вискозиметров, предназначенных для измерения динамической вязкости, отличаются сложностью конструкции, так как нуждаются в стабилизации частоты вращения измерительного ротора, большими затратами времени на температурную подготовку исследуемого образца, для чего применяются термостаты, и невысокой точностью измерения [1]. Кроме того, зарубежные вискозиметры, например фирмы Brookfield, имеют высокую стоимость [2].

Предлагается новый алгоритм обработки измерительной информации ротационного метода измерения вязкости, позволивший упростить конструкцию вискозиметра, исключить применение термостата и сократить затраты времени на измерение вязкости при заданной температуре [3].

Известно, что в основе методов измерения динамической вязкости лежит закон Ньютона [4]. Сила, приложенная к измерительному ротору, для ньютоновских жидкостей определяется выражением

Корганова Ольга Георгиевна (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

Кузнецов Владимир Андреевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационно-измерительная техника».

$$F = \eta \frac{\omega S}{h}, \quad (1)$$

где η – вязкость исследуемой жидкости;

ω – угловая скорость вращения ротора;

S – рабочая площадь ротора;

h – толщина слоя жидкости.

Из (1) видно, что вязкость может быть определена по силе, приложенной к измерительному ротору, при стабилизации остальных параметров, входящих в это выражение. На практике удобнее измерять не силу, а крутящий момент, приложенный к измерительному ротору:

$$M = F R,$$

где R – радиус измерительного ротора.

С учетом (1) и связи между угловой скоростью и частотой вращения измерительного ротора выражение для крутящего момента примет вид

$$M = \eta \frac{2\pi n S R^2}{h}, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость;

n – частота вращения измерительного ротора;

S – площадь рабочей поверхности ротора;

R – радиус ротора;

h – толщина слоя жидкости между боковыми поверхностями ротора и измерительного цилиндра.

Выражение (2) положено в основу работы большинства современных вискозиметров. Вязкость определяется по алгоритму [5]

$$\eta = \frac{h}{2\pi n S R^2} M. \quad (3)$$

Недостаток этого метода измерения связан с тем, что крутящий момент, по которому определяется вязкость, зависит не только от этой вязкости, но и от частоты вращения n измерительного ротора, что приводит к необходимости стабилизации этого параметра и усложнению конструкции прибора.

Разработанная конструкция измерительного преобразователя позволила алгоритмически устранить этот недостаток и создать вискозиметр, инвариантный к частоте вращения измерительного ротора [6].

На рис. 1 представлена структурная схема разработанного прибора для измерения динамической вязкости.

Вращение измерительного ротора (ИР) осуществляется приводом (ПР) через калиброванную измерительную пружину (ИП). Диски с метками (ДМ) насажены соответственно на оси привода и измерительного ротора, поэтому при вращении измерительного ротора в исследуемой жидкости (ИЖ) диск на измерительном роторе отстает от диска на приводе вследствие вязкого трения. Угол закручивания измерительной пружины пропорционален крутящему моменту, если пружина работает в пределах линейной зоны деформации [7].

Независимость результата измерения вязкости от частоты вращения измерительного ротора достигается следующим образом [8].

В дисках выполнены радиальные прорезы, через которые проходит свет оптопар. При прохождении каждой прорези внутри оптопары генерируется электрический импульс, поступающий на вход триггера Т [9].

Угол закручивания измерительной пружины определяется выражением

$$\alpha = \frac{1}{K_{\Pi}} M, \quad (4)$$

где K_{Π} – коэффициент жесткости пружины;

M – крутящий момент, определяемый выражением (2).

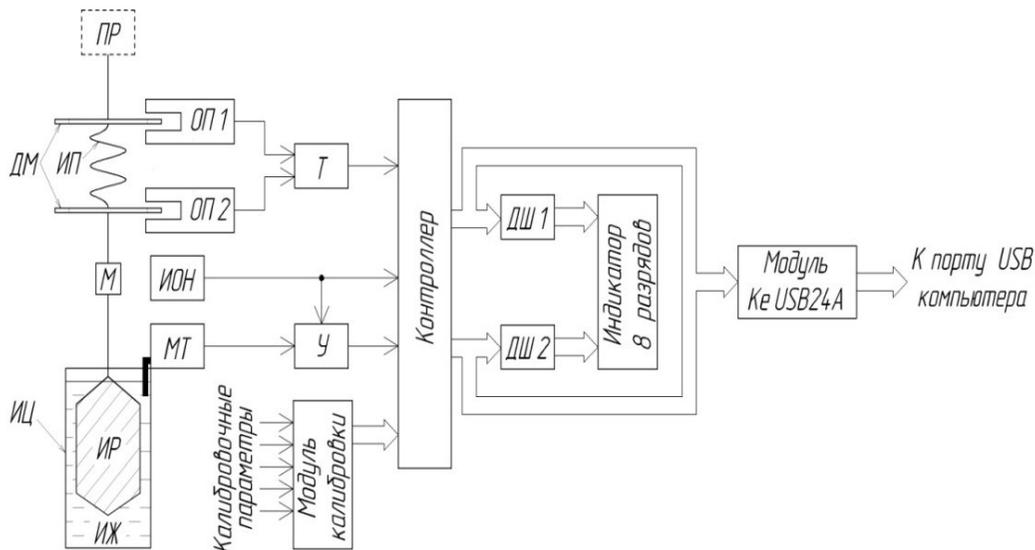


Рис. 1. Структурная схема ротационного вискозиметра

При закручивании пружины электрические импульсы оптопар сдвигаются относительно друг друга на время τ :

$$\tau = \frac{T}{2\pi} \alpha = \frac{\alpha}{2\pi n}. \quad (5)$$

Здесь T – период вращения измерительного ротора;

n – частота вращения измерительного ротора.

Отсюда

$$\tau = \frac{M}{2\pi n K_{\Pi}}. \quad (6)$$

Подставляя (2) в (5), получим

$$\tau = \frac{M}{2\pi n K_{\Pi}} = \frac{\eta 2\pi n S R^2}{h 2\pi n K_{\Pi}} = \frac{n S R^2}{h K_{\Pi}}. \quad (7)$$

Из (7) находится алгоритм определения вязкости:

$$\eta = \frac{h2\pi n K_{\Pi} \tau}{2\pi m S R^2} = \frac{h K_{\Pi}}{S R^2} \tau \quad (8)$$

Из этого выражения видно, что вязкость однозначно определяется по интервалу времени τ , а из алгоритма измерения исключено значение частоты вращения измерительного ротора n .

Интервал времени τ формируется триггером Т и поступает на вход микроконтроллера, который с помощью встроенного АЦП преобразует его в цифровой вход.

Разработанный способ измерения вязкости позволил в качестве электропривода использовать малогабаритные двухфазные синхронные электродвигатели переменного тока без стабилизации частоты вращения и одновременно снизить погрешность измерения вязкости.

Для обеспечения высокой точности измерения вязкости необходимо выполнить условие

$$\frac{h K_{\Pi}}{S R^2} = const .$$

Точность измерения вязкости зависит от стабильности геометрических размеров h, S, R и коэффициента жесткости пружины K_p . Особое внимание уделяется стабилизации коэффициента жесткости пружины, которая в процессе изготовления подвергается закалке и термотренировке. Из геометрических параметров наибольшее влияние на точность измерения вязкости оказывает нестабильность радиуса ротора, значение которого входит в функцию преобразования в квадрате.

Микроконтроллер производит анализ и измерение ШИМ-сигнала и напряжения, пропорционального температуре, преобразование их в цифровой код, сдвиг нуля и масштабирование. В итоге на восьмиразрядный семисегментный цифровой индикатор через дешифраторы ДШ1 и ДШ2 выдаются в динамическом режиме результаты измерения температуры и вязкости. Через ДШ1 передается двоично-десятичный код результата, а через ДШ2 – адрес подсвечиваемого разряда. При необходимости результаты измерения можно передать на компьютер через схему сопряжения, выполненную на типовом модуле KeUSB24A, который связывает микроконтроллер с компьютером через линии USB. Для выполнения сервисных операций, таких как сдвиг «нуля» и изменение чувствительности, используется модуль калибровки, связанный с микроконтроллером по пяти линиям ввода данных. Это линии выбора «температура/вязкость», фиксирования «нуля», увеличения и уменьшения коэффициента чувствительности и фиксирования «чувствительности». На рис. 2 приведен алгоритм работы микроконтроллера. При подаче питания или сигнала начального сброса микроконтроллер осуществляет следующие действия:

1. Запрет прерывания и настройка указателя стека.
2. Настройка таймера для работы на режиме переполнения от внутреннего генератора. В случае переполнения таймера формируется сигнал прерывания, который вызывает программу обработки прерывания.
3. Конфигурация портов.
4. Задание начальных значений переменным. Некоторым переменным значения присваиваются непосредственно, значения начальных сдвигов и коэффициентов чувствительности температуры и вязкости загружаются из энергонезависимой памяти (EEPROM).

5. Считывание данных состояния портов ввода. Необходимо для анализа событий на входных портах микроконтроллера в программе прерывания.
6. Загрузка начального значения в таймер. Величина начального значения определяет интервал времени, через который таймер переполнится и вызовет программу обработки прерывания.
7. Разрешение прерывания. После этого микроконтроллер не выполняет никаких действий и переходит в состояние ожидания прерывания.

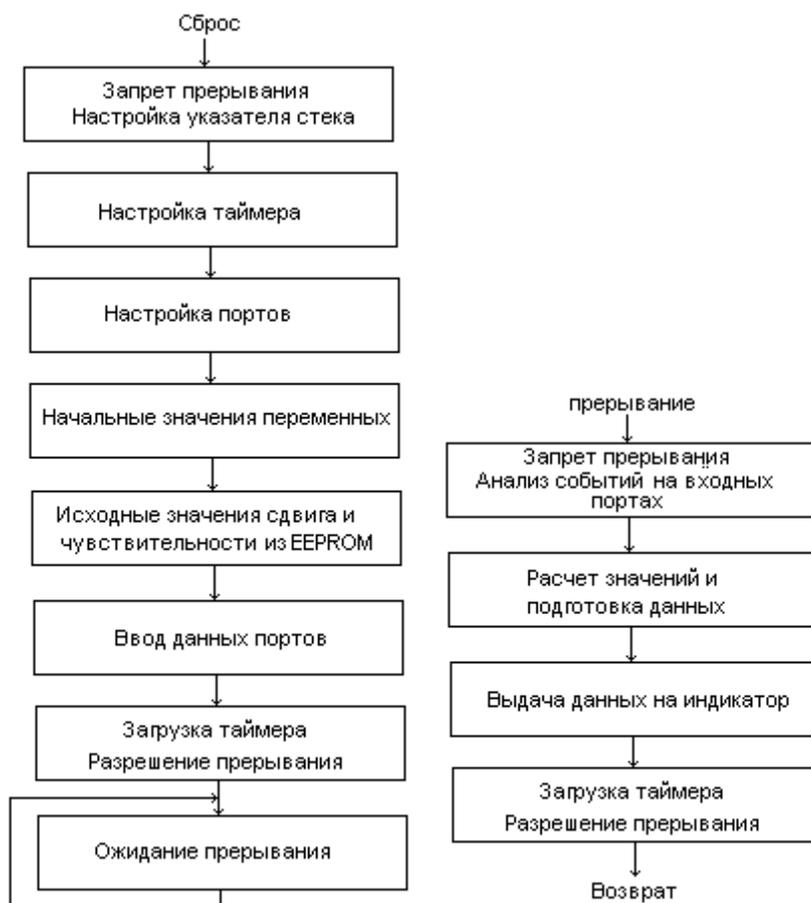


Рис. 2. Алгоритм работы микроконтроллера

Программа обработки прерывания производит следующие действия:

1. Анализ событий на входных портах микроконтроллера и соответствующая реакция на каждое событие. В процессе анализа считывается текущее состояние портов и сравнивается с предыдущим, которое считано во время предшествующего прерывания или при начальном запуске программы. Для порта, на который подается ШИМ-сигнал, анализ позволяет выделить передний и задний фронты ШИМ-сигнала. Для портов, обслуживающих модуль калибровки, формируются команды установки «нуля» и «чувствительности», увеличения/уменьшения чувствительности и идентификации канала, по которому производятся действия по калибровке.
2. Расчетные операции в зависимости от событий на входных портах. Исход-

ные данные для расчета вязкости – число импульсов прерывания, подсчитанных между разноименными фронтами ШИМ-сигнала. Подсчет числа импульсов между передним и задним фронтом дает информацию о величине, пропорциональной динамической вязкости, а между одноименными фронтами – о величине, обратно пропорциональной динамическому сдвигу. После усреднения подсчитанных данных за известное число оборотов измерительного ротора производятся арифметические операции сдвига «нуля», масштабирования и подготовки данных для выдачи на цифровой индикатор. При обнаружении некоторых событий, связанных с модулем калибровки, расчетные операции заканчиваются записью в EEPROM новых значений «нуля» и коэффициента чувствительности. После каждой записи новых калибровочных значений программа принудительно «зависает». Это сделано специально, т. к. время выполнения длительных операций с EEPROM может превысить интервал прерывания. Кроме того, это служит дополнительным напоминанием о том, что после изменения чувствительности не забыли выполнить операцию записи нового коэффициента в EEPROM (операции увеличения и уменьшения коэффициента чувствительности производятся в оперативной памяти). После зависания программы гаснет индикация и необходимо выключить и заново включить прибор, а при начальном сбросе новые значения «нуля» и коэффициента чувствительности извлекаются из EEPROM.

3. Выдача данных из микроконтроллера на индикатор. Таким образом, динамическая индикация выполняется с частотой прерывания микроконтроллера.

4. Восстановление начального значения таймера и переход в режим ожидания прерывания.

Выполнение всех этих действий происходит за время, меньшее времени переполнения таймера, которое задается при его настройке, т. к. длительные операции с EEPROM не используются, поэтому частота прерываний является стабильной и используется как опорная для измерения параметров ШИМ-сигнала. Операция по аналого-цифровому преобразованию напряжения, пропорционального температуре, выполняется при каждом прерывании, однако на индикатор передается сдвинутое и отмасштабированное усредненное значение. Время усреднения температуры меньше времени усреднения вязкости, поэтому значения температуры на индикаторах обновляются чаще, чем значения вязкости.

Вязкость жидкостей сильно зависит от температуры, в связи с чем она измеряется при заданной температуре. Эта температура обычно поддерживается с помощью термостата, что приводит к большим затратам времени на подготовку исследуемого вещества. В вискозиметре ВРЦ используется другой способ.

Вискозиметр автоматически производит измерение вязкости при достижении исследуемой жидкостью заданной температуры в процессе ее остывания, что позволяет не использовать термостат и сократить время термоподготовки жидкости.

Заданная температура вводится в память микроконтроллера заранее и может быть перенастроена пользователем.

Вискозиметр имеет порт вывода информации о вязкости и температуре в цифровом виде для передачи ее в ЭВМ.

В состав прибора входят:

1) измерительный блок, представляющий собой стойку, на которой расположен двигатель с редуктором, измерительная пружина, диски с фотодатчиками, электронный блок;

2) ротор и измерительный стакан с закрепленным на нем малоинерционным

термометром;

3) ноутбук, соединенный с измерительным блоком по линиям USB (только для ВРЦ);

4) эталонная жидкость для калибровки.

Для прибора ВРЦ разработана программа (под WinXP), с помощью которой все результаты измерения и калибровки выводятся на экран, снабжаются индикаторами времени и заносятся в архив.

Основные технические характеристики вискозиметра типа ВРЦ приведены в таблице.

Основные технические характеристики вискозиметра типа ВРЦ

Параметр	Значение
Диапазон измерения вязкости, Па·с (Пуаз)	2...100 (20...1000)
Диапазон измерения температуры, °С	0...100
Основная приведенная погрешность измерения вязкости, %	2,5
Абсолютная погрешность измерения температуры, °С	0,5
Напряжение питания, В(АС)	220
Габариты в рабочем положении, мм	270×200×460
Масса прибора, кг	10

Перспективным направлением развития вискозиметрии является применение микроконтроллера для повышения точности измерения вязкости, в частности для исключения погрешностей, связанных с нестабильностью параметров, входящих в формулу (4). Точность измерения может быть повышена алгоритмическими методами [10, 11, 12].

На рис. 3 представлена структурная схема ротационного вискозиметра повышенной точности [3]. В основу работы вискозиметра положены тестовые методы повышения точности измерения.

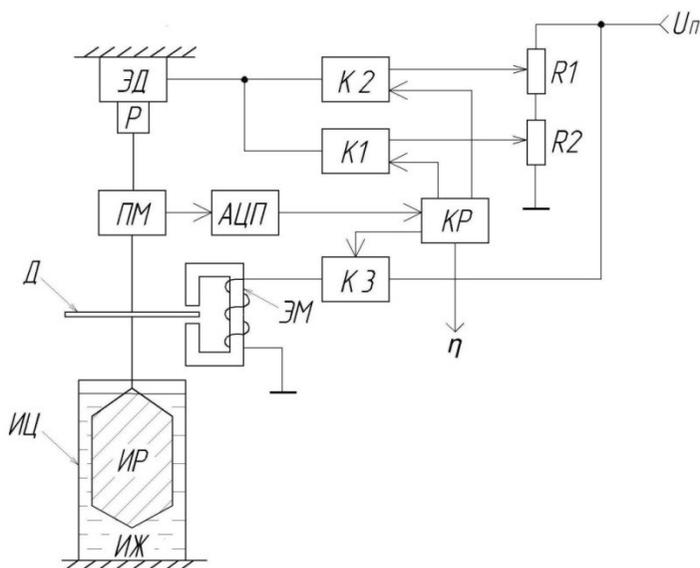


Рис. 3. Структурная схема ротационного вискозиметра повышенной точности

Исследуемой жидкостью ИЖ заполняется неподвижный стакан, в который помещается вращающийся измерительный ротор ИР. Измерительный ротор приводится во вращение электродвигателем ЭД через редуктор Р. При вращении ротора в исследуемой жидкости возникает тормозной момент, который пропорционален вязкости жидкости:

$$M_T = K_p n \eta,$$

где K_p – конструктивный коэффициент, зависящий от размеров стакана и ротора; n – частота вращения ротора; η – динамическая вязкость.

Тормозной момент преобразуется преобразователем (ПМ) в электрический сигнал, а затем посредством АЦП в код, который поступает на вход микроконтроллера КР:

$$N = K_{\Pi} K_p K_{АЦП} n \eta,$$

где N – код, поступающий на вход контроллера;
 K_{Π} – коэффициент преобразования преобразователя крутящего момента;
 $K_{АЦП}$ – коэффициент преобразования АЦП.

Основными источниками погрешности вискозиметра являются неустойчивость коэффициентов K_p , K_{Π} , $K_{АЦП}$, а также аддитивные погрешности [13, 14].

Для повышения точности измерения вязкости формируются два теста: аддитивный и мультипликативный, а измерения проводятся в три такта. Вычислительные операции и управление вискозиметром выполняются микроконтроллером (КР) [15, 16].

В первом такте ключ К1 открыт, а ключи К2 и К3 закрыты, на электродвигатель подается напряжение, устанавливающее частоту вращения ротора n_1 . На вход контроллера поступает код:

$$N_1 = K_{\Pi} K_p K_{АЦП} n_1 \eta + \Delta \alpha,$$

где $\Delta \alpha$ – аддитивная погрешность.

Во втором такте открывается ключ К3, и электромагнит ЭМ создает дополнительный тормозной момент за счет наведения вихревых токов в диске Д. На вход контроллера поступает код аддитивного теста:

$$N_2 = K_{\Pi} K_p K_{АЦП} n_1 (\eta + M) + \Delta \alpha,$$

где M – дополнительный эталонный тормозной момент.

В третьем такте создается мультипликативный тест, при этом ключ К2 открыт, а ключи К1 и К3 закрыты. На электродвигатель подается более высокое напряжение, вследствие чего частота вращения ротора возрастает до n_2 . На вход контроллера поступает код мультипликативного теста:

$$N_3 = K_{\Pi} K_p K_{АЦП} n_2 \eta + \Delta \alpha.$$

Результаты трех измерений обрабатываются контроллером по алгоритму:

$$N_2 - N_1 = K_{\Pi} K_p K_{АЦП} n_1 M;$$

$$N_3 - N_1 = K_{\Pi} K_p K_{АЦП} \eta (n_2 - n_1);$$

$$\frac{N_3 - N_1}{N_2 - N_1} = \frac{\eta (n_2 - n_1)}{n_1 M}.$$

Отсюда определяется вязкость исследуемой жидкости:

$$\eta = \frac{(N_3 - N_1)(n_1 M)}{(N_2 - N_1)(n_2 - n_1)}$$

Из этого выражения видно, что тестовые методы позволяют полностью исключить из результата измерения аддитивные и мультипликативные погрешности. Точность измерения вязкости определяется погрешностью задания эталонного тормозного момента, погрешностью установки частоты вращения ротора и погрешностью вычислительных операций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крутоголов В.Д., Кулаков М.В. Ротационные вискозиметры. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
2. Brookfield [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.brookfieldengineering.com/products>
3. А.с. 1809669 US, МКИ³ G 01 N 11/14. Ротационный вискозиметр / В.А. Кузнецов, А.А. Чикурин.
4. Курс физики: Учеб. в 2 т. / Под ред. В.Н. Лозовского. – 6-е изд., испр. и доп. – М., Спб., Краснодар: Лань, 2009. – 572 с., 600 с.
5. Кузнецов В.А. Физические основы получения информации: учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 216 с.
6. Максудян Л.П., Разикова Н.В. Методология выбора методик испытаний и измерений — инструмент обеспечения безопасности и качества продукции // Контроль качества продукции. – 2018. – № 9. – С. 25–28.
7. Измерения в промышленности / Под ред. П. Профоса. – М.: Металлургия, 1990. – 462 с.
8. Даренский А.Н., Гончаров И.В., Обласов Н.В. Особенности определения вязкости пластовых нефтей на капиллярном вискозиметре при проведении PVT-тестов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 7. – С. 825–833.
9. Тотильский В.Б. Схемотехника измерительных устройств. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 232 с.
10. Бромберг Э.М., Куликовский К.Л. Тестовые методы повышения точности измерений. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
11. Кузнецов В.А. Методы повышения помехоустойчивости и точности средств измерений: Учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 68 с.
12. Корганова О.Г., Кузнецов В.А. Повышение точности вискозиметра методом образцовых мер // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. науч. статей. Вып. 1 (9). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 23–27.
13. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. – М.: Техносфера, 2006. – 592 с.
14. Трапперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров: Пер. с нем. – К.: МК-Пресс, 2007. – 208 с.
15. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. АЦП / ЦАП. – М.: Техносфера, 2006. – 392 с.
16. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. Т. 2. – М.: Лань, 2016. – 384 с.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2018 г.

AUTOMATIC DETERMINATION OF VISCOSITY BY ROTARY VISCOSIMETER VRTS

O.G. Korganova, V.A. Kuznetsov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*Olga G. Korganova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Vladimir A. Kuznetsov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

Abstract. *If it is necessary to determine the viscosity at a given temperature, various viscosimeters of various types, mostly rotational viscometers can be used. One of them was developed at the Department of Measuring Technique of Samara State Technical University. It contains two channels: a viscosity measuring channel and a temperature measuring channel. Rotation of the measuring rotor is carried out by a drive through a calibrated spring, the angle of twisting of which is proportional to the torque, which is converted into a pulse-width signal. The microcontroller measures and analyzes this signal and a signal proportional to temperature, converts them into a digital code and outputs the information on viscosity and temperature through the output port in a digital form.*

Keywords: *viscosity, rotary method of measurement, microcontroller, increase measurement accuracy.*

REFERENCES

1. *Krutogolovov V., Kulakov M.* Rotary Viscometers. M: Publishing House "Mashinostroeniye". – 1984. –112 p. (in Russian)
2. Brookfield. – URL: <https://www.brookfieldengineering.com/products>
3. *Kuznetsov V., Chikurin A.* Rotational viscometer. Author's certificate 1809669 US, MKI³ G 01 N 11/14. (in Russian)
4. Physics course. Textbook in 2 volumes. Edited by V. Losovsky. 6-th edition. M: Publishing House "Lan". – 2009. – 572 p. (in Russian)
5. *Kuznetsov V.* Physical basis of obtaining information. Study guide. Samara, Samara State Technical University. – 2015. – 216 p. (in Russian)
6. *Maksudian L.P., Razikova N.V.* Methodology for selection of test and measurement methods – product safety and quality tool. Product quality control. №9, 2018. pp 25–28. (in Russian)
7. Industry measurements. Edited by Profos P. M: Publishing House "Metallurgy". – 1990. – 462 p. (in Russian)
8. *Darenskii A.N., Goncharov I.V., Oblasov N.V.* Features of determining viscosity of reservoir oils on a capillary viscometer when conducting PVT-tests. International Journal of Applied and Basic Research. № 7, 2016. pp 825–833. (in Russian)
9. *Topilskiy V.* Measurements circuit engineering. M: Publishing House "Binom. Laboratory of knowledge". – 2006. – 232 p. (in Russian)
10. *Bromberg E., Kulikovskiy K.* Test methods for improving measurement accuracy. M.: Publishing house "Energy". – 1978. – 176 p. (in Russian)
11. *Kuznetsov V.* Methods to improve noise immunity and accuracy of measuring instruments. Study guide. Samara, Samara State Technical University. – 2011. – 78 p. (in Russian)
12. *Korganova O., Kuznetsov V.* Improving the accuracy of the viscometer by the method of reference standard. Digest of articles "Information – measuring and control systems". Volume 1 (9). – Samara, Samara State Technical University. – 2014. – pp 23–27. (in Russian)
13. *Fryden J.* Modern sensors. Handbook. M: Publishing House "Technosphere". – 2006. – 592 p. (in Russian)
14. *Trampert V.* Measurement, control and regulation using AVR microcontrollers. Translation from german. M: Publishing House "MK-Press". – 2007. – 208 p. (in Russian)
15. *Rathor T.* Digital measurements. ADC/DAC. M: Publishing House "Technosphere". – 2006. – 392 p. (in Russia)
16. *Sorokin V.S., Antipov B.L., Lazareva N.P.* Materials and elements of electronic equipment. Volume 2. Publishing Lan, 2016. – 384 p.