ВЕСТН. САМАР. ГОС. ТЕХН. УН-ТА. СЕР. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. 2017. № 4 (56)

Приборостроение, метрология   
и информационно-измерительные приборы   
и системы

УДК 681.518

ВЛИЯНИЕ ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ТУРБОМАШИНЫ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ САМОКОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДАТЧИК

М.М. Кутейникова, П.Е. Подлипнов [[1]](#footnote-1)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук

Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

Рассматривается метод измерения радиальных зазоров, в котором используется самокомпенсация температурных воздействий на одновитковый вихретоковый датчик с чувствительным элементом в виде отрезка проводника. Приведены результаты вычислительных экспериментов, полученных на модели электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента с торцами лопаток рабочего колеса компрессора и турбины. Результаты представлены количественными оценками влияния осевых смещений рабочего колеса как компрессора, так и турбины. Показано, что такое влияние возрастает почти вдвое в турбине, причем в меньшем диапазоне изменений осевых смещений, что связано с повышенной кривизной поверхности пера турбинной лопатки.

**Ключевые слова:** одновитковый вихретоковый датчик, метод измерения радиальных зазоров, газотурбинный двигатель, температурные воздействия на датчик, влияние осевых смещений, модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента и лопатки.

**Введение**

От радиальных зазоров (РЗ) между статором и торцами лопаток рабочего колеса (РК) компрессора или турбины зависят экономичность и надежность современных турбомашин и, в частности, авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Поэтому проблема измерения РЗ в тяжелейших условиях (температура свыше 1000 °C, высокая линейная скорость перемещения торцов лопаток, превышающая скорость звука, и другие мешающие факторы (МФ)) по-прежнему актуальна как при экспериментальных исследованиях ГТД в процессе их доводки в стендовых условиях, так и в процессе эксплуатации ГТД в системах управления и диагностики, где используется информация о РЗ.

В работе [1] приведено описание компьютеризированных систем, ориентированных на стендовые испытания ГТД, в которых для измерения РЗ применяются одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительными элементами в виде отрезка проводника, размещаемого непосредственно в газовоздушном тракте компрессора или турбины ГТД. ЧЭ с помощью тоководов (ТВ) в виде соосных цилиндров связан с объемным витком (ОВ) согласующего трансформатора (СТ), первичная обмотка которого включена в измерительную цепь (ИЦ). При этом ЧЭ, ТВ и ОВ СТ изготовлены из тех же жаропрочных сплавов, что и лопатки РК, обеспечивающие работоспособность ОВТД при высоких температурах. При этом для уменьшения влияния температуры на результаты измерения РЗ согласно [1] используется дополнительный ОВТД, выполняющий компенсационные функции в дифференциальной ИЦ, причем его ЧЭ находится в тех же температурных условиях, что и рабочий ОВТД, но занимает положение, в котором электромагнитного взаимодействия его ЧЭ с торцами лопаток не происходит. Недостаток такого способа связан с трудностями подбора пар температурно-идентичных ОВТД при существующей технологии их изготовления, а также необходимости выполнения дополнительного установочного отверстия в статорной оболочке.

Необходимо также отметить, что при решении задачи измерения РЗ с помощью ОВТД серьезными МФ (кроме температуры среды в газовоздушном тракте) являются многомерные смещения торцов лопаток РК. В системе отсчета 0*XYZ*, где точка 0 (начало отсчета) расположена на статоре, ось *X* направлена вдоль оси РК, ось *Y* по его радиусу, ось *Z* – в направлении вращения РК, искомые РЗ определяются координатой *y,* а МФ являются осевые смещения РК (координата *x*), изгиб лопатки в направлении оси *Z* (координата *z*), крутильные колебания относительно оси *Y* и другие. Наиболее радикальным способом устранения влияния этого вида МФ, например осевых смещений (координата *x*), является измерение не только искомой координаты *y*, но и координаты *x*. С увеличением числа МФ соответственно возрастает и число измеряемых координат (*y*, *x*, *z...*).

Реализация такого способа возможна с помощью так называемых кластерных методов [2], предусматривающих применение кластера (группы) ОВТД по числу измеряемых координат, что требует выполнения соответствующего числа установочных отверстий в статорной оболочке, причем число отверстий приходится удваивать с учетом ОВТД, выполняющих компенсационные функции.

Поэтому, признавая практическую значимость кластерных методов при решении исследовательских задач, связанных с многомерными измерениями смещений торцов лопаток (в стендовых условиях), следует отметить, что их применение вряд ли возможно в процессе эксплуатации ГТД при решении задач управления и диагностики, когда число установочных отверстий предельно ограничено.

Возвращаясь к температурным воздействиям, отметим, что представляется весьма заманчивой идея их самокомпенсации, при реализации которой достаточно одного ОВТД, выполняющего как рабочие, так и компенсационные функции [3]. Метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий ориентирован на применение в системах измерения и диагностики в эксплуатационном режиме, и его краткое описание приведено в настоящей статье. Что же касается МФ в виде многомерных смещений торцов лопаток, то количественная оценка влияния осевых смещений РК как наиболее значимого МФ по степени воздействия на результаты измерения РЗ также приводится в настоящей статье. При этом такие оценки получены на модели электромагнитного взаимодействия (ЭМВ) ЧЭ датчика с торцевой частью лопаток, применяемых как в компрессоре, так и в турбине[[2]](#footnote-2) [4].

**Метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий**

Как отмечалось во введении, рассматриваемый метод ориентирован на применение в компрессорах и турбинах ГТД.

На рис. 1 представлены возможные конструктивные разновидности лопаток, применяемых в компрессоре (*а*) и в турбине (*б*) (вид со стороны статора), а также их сечения плоскостью, параллельной оси лопатки и координатной оси *Y* системы отсчета 0*XYZ*, направленной по радиусу РК. Там же показаны геометрические центры лопаток (г.ц.л.), полученные в предположении, что изображения торцевой части обеих разновидностей лопаток находятся в плоскости *ZX*, а г.ц.л. определяются как точки пересечения прямых, проходящих через центры их проекций на ось *Х*, с изображениями средних линий, показанных пунктиром.

а)

б)

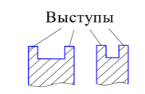
Р и с. 1.Компрессорная (*а*) и турбинная (*б*) лопатки

А-А Б-Б

Б

А

Б



г.ц.л.

А

*X*

*Z*

*X*

Б

А-А

А

А

*Z*

г.ц.л.

0

0

На рис. 2 изображены по два положения РК компрессора и турбины относительно ЧЭ ОВТД и систем отсчета 0*XYZ*, начала которых (точки 0) и ось *Y* совпадают с центрами ЧЭ. При этом в левой части рис. 2, *а* (как и в левой части рис. 2, *б*) положение г.ц.л. под номером 1 совпадает с центрами ЧЭ и точками 0 (положение РК I). Напротив, в правой части обоих рисунков (*а*, *б*) показаны новые положения РК II, смещенные в направлении оси *Z* на угол 0,5ΔΨ, где ΔΨ – шаг размещения лопаток 1, 2, ..., *n*л-1, *n*л (*n*л – число лопаток). В этом положении РК центры ЧЭ и точек 0 совпадают с центрами промежутков между лопатками 1 и 2.

1

2

*Z*

ЧЭ

*X*

0(*Y*)

1

2

*Z*

0(*Y*)

ЧЭ

*X*

*РК*

*Положение I*

*Положение II*

*Направление вращения*

**

**

*РК*

*n*л

*n*л

*n*л

1

ЧЭ

2

*Z*

*X*

1

2

ЧЭ

*Z*

*X*

0(

*Y*

)

0(*Y*)

*n*л

**

**

*РК*

*РК*

*Положение I*

*Положение II*

*Направление вращения*

Рис. 2. Размещение ЧЭ ОВТД и системы отсчета 0*XYZ* относительно лопаток РК   
в компрессоре (*а*) и турбине (*б*)

Если предположить, что вращение РК происходит в нормальных температурных условиях, то эквивалентная индуктивность ЧЭ будет иметь максимально возможное значение (*L*0) при совпадении центра ЧЭ (и точки 0) и центра межлопаточного промежутка. Вместе с тем при совпадении центра ЧЭ (и точки 0) с центром лопатки (положение РК I) согласно [1] индуктивность уменьшается и становится равной *L*0‑Δ*Ly*, где Δ*Ly* – изменение эквивалентной индуктивности, связанное с изменением координаты *y* (РЗ) (1).

При воздействии температуры на элементы конструкции ОВТД (и датчик в целом), как показали результаты исследований, приведенных в [5], эквивалентная индуктивность СТ и, можно считать, эквивалентная индуктивность ЧЭ возрастают на величину Δ*L*Θ независимо от положения лопатки относительно ЧЭ ОВТД.

В итоге для первого (I) из двух (I и II) рассмотренных положений РК относительно ЧЭ (когда торец контролируемой лопатки находится в зоне чувствительности датчика) эквивалентную индуктивность ЧЭ можно представить в виде

. (1)

Для второго положения (II) (когда в зоне чувствительности датчика торец контролируемой лопатки отсутствует) выражение (1) примет вид

, (2)

где  и  – экстремальные значения эквивалентной индуктивности ЧЭ.

Предлагаемый метод измерения РЗ с самокомпенсацией температурных воздействий на ОВТД предусматривает фиксацию  в положениях I, II РК и получение разности

 (3)

которая не зависит от температурных воздействий на ОВТД (Δ*L*Θ) и определяется только искомыми изменениями индуктивности ЧЭ (∆*Ly*).

Полагая, что РК находится в процессе равномерного вращения, эквивалентную индуктивность ЧЭ можно представить в виде функции времени *L*ЧЭ(*t*) или координаты *z ‑ L*ЧЭ(*z*) (рис. 3).

Как было показано в работе [6], из-за наличия выступов в торцевой части турбинной лопатки наблюдается эффект «двоения» минимальных значений. Поэтому информативным принято считать наименьший из двух минимумов (рис. 3, *б*, эпюры 1). На том же рисунке представлены результаты преобразования, полученные в соответствии с выражением (3), – экстремальное (максимальное) значение разности (эпюра 2).

Как уже отмечалось, изменения эквивалентной индуктивности, связанные с температурными воздействиями непосредственно на ОВТД (Δ*L*Θ), могут быть намного больше, чем изменения эквивалентной индуктивности от искомых РЗ – координаты *у* *(*Δ*Ly*), причем в наибольшей степени это проявляется в турбине по сравнению с компрессором, где температура в проточной части отличается почти вдвое.

Рис. 3. Функции *L*ЧЭ(*t*) (*L*ЧЭ(*z*)) при ∆*L*Θ=0 и ∆*L*Θ≠0 (эпюры 1) в компрессоре (*а*) и турбине (*б*), а также разности экстремальных значений этих функций (эпюры 2)

а)

б)



*t*(*z*)

∆*Ly*

*L*0

1

2

3

4







Номера лопаток



∆*Ly*

∆*LΘ*

*L*0





1

2

3

4





Номера лопаток

*t*(*z*)



*t*(*z*)

∆*Ly*

1

2

3

4



Номера лопаток

∆*Ly*





(1)

1

2

3

4

Номера лопаток

*t*(*z*)





*L*0

*L*0

∆*L*Θ=0

∆*L*Θ≠0

(1)

(2)

(2)

*t*(*z*)





*t*(*z*)

**Влияние осевых смещений РК на измерения РЗ**

Действительно, осевые смещения РК наблюдаются на всех ступенях компрессора (кроме одной – высокого давления) и на ступенях турбины.

Для количественной оценки влияния осевых смещений на результат измерения РЗ с помощью рассмотренного метода использовалась известная модель ЭМВ ЧЭ с торцевой частью турбинной лопатки [4]. При этом размеры лопатки и ЧЭ, а также другие параметры, необходимые для моделирования, полностью совпадают с исходными данными, которые использовались ранее [4, 7]. Кроме того, несмотря на принципиальные отличительные особенности формы торцевой части лопаток, применяемых в турбине и компрессоре, та же модель использовалась и для компрессорной лопатки упрощенной формы, близкой к прямоугольной, с малой кривизной пера и отсутствием выступов. В исходные данные были внесены изменения геометрических параметров торца лопатки (в соответствии с реальными размерами компрессорной лопатки)[[3]](#footnote-3), а все остальные исходные данные оставались неизменными.

Результаты моделирования, полученные в предположении применения рассматриваемого метода в компрессоре с учетом размещения ЧЭ ОВТД и системы отсчета 0*XYZ* в г.ц.л. (в соответствии с рис. 2, *а*), представлены в виде зависимостей экстремальных значений эквивалентной индуктивности ЧЭ от координаты *x* при постоянных *y* (0,5 и 1,5 мм) (рис. 4, *а*).

Полагая, что на экстремальные значения эквивалентной индуктивности ЧЭ  не оказывают влияние температурные воздействия, но происходят смещения контролируемой лопатки с изменениями координат *y* и *x*, по аналогии с выражениями (1), (2) можно записать

  (4)

где  – результат моделирования (положение РК I),  – результат моделирования (положение РК II), который согласно [7] определяется индуктивностью ЧЭ при *y*→∞ (*L*ЧЭ∞=3,657·10-9 Гн).

а)

б)

3,64

3,63

3,62

3,61

3,60

3,59

3,58

-1

-3

4

1



-5

0,5 мм

5

3,57

*у=*1,5 мм

*X*, мм

-1

-3

3

1

-5

1,5 мм

5

*у=*0,5 мм

*X,* мм

0,09

0,08

0,07

0,06

0,05

0,04

0,03

0,02

**

**



Рис. 4. Зависимости  (*а*) и  (*б*) при *y* = const (0,5 и 1,5 мм).   
Контролируемая лопатка – компрессорная

В соответствии с рассматриваемым методом и выражением (3) искомые изменения индуктивности ЧЭ представляются в виде

.

Однако тот же результат может быть получен из выражения (4)

,

где результаты моделирования представлены функцией (*x,y*) (рис. 4, *а*), т. е.  и числовым значением в Гн индуктивности *L*чэ∞.

В графическом виде  как функция координаты *x* при постоянных значениях *y* (0,5 и 1,5 мм) изображена на рис. 4, *б*. На ее основе получены количественные оценки функций влияния (ФВ) осевых смещений (*x*-координаты):

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | . |  |

Расчеты ФВ в диапазоне изменений *x* от -3 мм до +3 мм показали, что применительно к компрессорной лопатке δ*L*ЧЭ(*x*) не превышает 6 % при *y*= 0,5 мм и уменьшается до 4 % при *y*= 1,5 мм (рис. 5, *а*), но чувствительность к изменениям *y*-координаты (РЗ) снижается.

За указанными пределами координаты *x* ФВ, а следовательно, погрешности, связанные с изменениями *x*, возрастают.

Необходимо также подчеркнуть, что результаты экспериментальных исследований, проведенных на реально существующей компрессорной лопатке, подтвердили результаты моделирования.

Результаты моделирования, выполненного в предположении использования предлагаемого метода в турбине для размещения ЧЭ ОВТД и системы отсчета 0*XYZ* по отношению к лопаткам, как показано на рис. 2, *б*, показали характер изменений  и при *y*= *const* (0,5 и 1,5 мм) аналогичный тем же функциям, что приведены на рис. 4.

Рис. 5. Влияние осевых смещений (контролируемые лопатки –   
компрессорная (*а*) и турбинная (*б*))

*X*, мм

6

5

4

3

2

1

0

-1

-2

0

2

1

3

δ*L*ЧЭ, %

1,5 мм

*у=*0,5 мм

-3

30

25

20

15

10

5

0

-1

0

-0,5

0,5

1,5

1

2

*X*, мм

δ*L*ЧЭ, %

1,5 мм

*у=*0,5 мм

*а*

*б*

Что же касается ФВ (рис. 5, *б*), то очевидная их несимметрия относительно точки *x*= 0 связана с высокой степенью кривизны боковых поверхностей спинки и корыта турбинной лопатки в ее головной части. При этом в том же диапазоне изменений *x*-координаты (±3 мм) ФВ, а следовательно, погрешность возрастают почти вдвое по сравнению с компрессором (до 10 %).

**Заключение**

Приведено описание метода измерения РЗ, ориентированного на применение как в компрессоре, так и в турбине. Его отличительная особенность от известных методов, в которых используется ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника, – это самокомпенсация температурных воздействий на датчик в целом и его элементы конструкции. При этом благодаря самокомпенсации отпадает необходимость в дополнительном ОВТД для термокоррекции и дополнительном установочном отверстии в статорной оболочке.

С помощью ранее разработанной модели ЭМВ ЧЭ с торцами лопаток исследовано влияние осевых смещений РК. Показано, что в диапазоне изменений осевых смещений (*x*-координаты) от -3 до +3 мм ФВ, а следовательно, погрешности не превышают 6 % в компрессоре. Погрешности возрастают почти вдвое в турбине, причем в меньшем диапазоне изменений *x* – от -1 до +2 мм, что связано с повышенной кривизной спинки и корыта турбинной лопатки.

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. Патент 2587644 РФ, МПК G01B 7/14. Способ измерения радиальных зазоров между торцами лопаток рабочего колеса и статорной оболочкой турбомашины / Белопухов В.Н., Подлипнов П.Е., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П., -2014154334/28; Заявл. 30.12.2014; Опубл. 20.06.2016, бюл. 17.
4. *Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.* Модель электромагнитного взаимодействия чувствительного элемента одновиткового вихретокового датчика с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XV Междунар. конф. / Самара: Из-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 627–635.
5. *Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. [и др.].* Анализ влияния температуры на информативные параметры одновитковых вихретоковых датчиков // Автометрия. – 2017. –№ 4. – С. 104–111.
6. *Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. [и др.].* Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия. – 2015. – № 3. – С. 104–112.
7. *Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П.* Результаты моделирования электромагнитного взаимодействия чувствительных элементов одновитковых вихретоковых датчиков в составе кластера с торцом лопатки сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XVI Междунар. конф./ Самара: Из-во СамНЦ РАН, 2013. – С. 636–641.
8. ГОСТ 23537-79 Лопатки авиационных осевых компрессоров и турбин. Термины и определения. – Москва: Издательство стандартов, 1979. – 33 с.

*Статья поступила в редакцию 3 сентября 2017 г.*

**INFLUENCE OF AXIAL DISPLACEMENTS OF TURBOMACHINE   
IMPELLER ON THE RESULTS OF MEASUREMENT OF RADIAL CLEARANCES WITH THE SELF-COMPENSATION OF TEMPERATURE IMPACT ON THE SENSOR**

***M.M. Kuteynikova, P.E .Podlipnov***[[4]](#footnote-4)

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences

61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

The method for measuring of radial clearance is considered. This method involves self-compensation of temperature impact on a single coil eddy-current sensor with sensitive element made as a conductor strip. The results of computational experiments based on the model of the electromagnetic interaction between an idealized sensing element of single-coil eddy current sensor with turbine and compressor blade tips are obtained. These results are given as quantitative evaluation of the influence of radial and axial displacements blades wheels in turbine and compressor. It's shown that the impact is doubled in turbines with a smaller range of variation in axial displacements. This is associated with an increase of the blade airfoil camber.

**Keywords**: single-coil eddy-current sensor, method for measuring of radial clearance, gas turbine engine, temperature impact on sensor, influence of axial displacements, model of the electromagnetic interaction.

ВЕСТН. САМАР. ГОС. ТЕХН. УН-ТА. СЕР. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. 2017. № 4 (56)

УДК 621.372.542

АППРОКСИМАЦИОННЫЙ МЕТОД КОРРЕКЦИИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА\*

П.К. Ланге [[5]](#footnote-5)

Самарский государственный технический университет

Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрен метод коррекции погрешности нелинейности измерительного преобразователя с характеристикой, имеющей существенную нелинейность. Метод основан на использовании параболической сплайн-аппроксимации дискретных значений характеристики датчика. В связи с существенной нелинейностью характеристики используется ее неравномерная дискретизация. С целью уменьшения числа интервалов дискретизации длина интервала обратно пропорциональна производной характеристики датчика. Рассмотрена погрешность сплайн-аппроксимации конкретного датчика – термистора. Показано, что использование сплайн-аппроксимации дискретных значений характеристики позволяет в несколько раз снизить погрешность аппроксимации по сравнению с широко распространенной кусочно-линейной аппроксимацией характеристики. С целью определения граничных значений функции сплайн-аппроксимации предложено экстраполировать функцию характеристики за границы динамического диапазона характеристики. Рассмотренный метод может быть легко реализован с использованием современных микропроцессорных измерительных систем.

**Ключевые слова:** измерительный преобразователь, нелинейность характеристики, сплайн-аппроксимация, кусочно-линейная аппроксимация, погрешность аппроксимации.

Характеристики практически всех датчиков различных параметров имеют определенную нелинейность; кроме того, характеристики могут меняться при различных режимах их работы.

На практике динамический диапазон преобразования датчиков может иметь значительную величину, однако линейный диапазон обычно много меньше полного динамического диапазона.

Например, для микродатчика расхода газа AWM2300 фирмы Honeywell линейный диапазон составляет около 20 % от полного динамического диапазона [1], аналогичная ситуация характерна и для ряда современных микродатчиков разнообразных физических параметров [2–4].

Для расширения линейного динамического диапазона используются различные методы коррекции нелинейности. Наибольшее распространение на практике получил метод реализации функции, обратной функции нелинейной характеристики датчика, а также метод реализации функции нелинейной характеристики функциональным преобразователем, включенным в цепь отрицательной обратной связи предусилителя сигнала, формируемого датчиком [1].

В обоих случаях используется либо аппроксимация функции нелинейной характеристики датчика, либо аппроксимация обратной функции. Наиболее распространенной является кусочно-линейная аппроксимация функции, заданной либо таблично, либо аналитически, такой способ и реализуется наиболее просто. При сравнительно небольшой нелинейности характеристики датчика может быть использована равномерная дискретизация характеристики, однако при сильной нелинейности с целью ограничения числа участков дискретизации и снижения погрешности аппроксимации характеристики приходится использовать неравномерную дискретизацию.

Следует отметить, что при определении табличных значений характеристики датчика на практике зачастую не удается обеспечить ее равномерную дискретизацию.

Например, при аппроксимации характеристики терморезистора, характеристика которого для температурного диапазона (-30…+100) °С представлена на рис. 1, при использовании 50 участков аппроксимации этой характеристики при равномерной дискретизации погрешность аппроксимации составила 13 %, а при неравномерной дискретизации – 0,2 % [5].

400

320

240

*R*(*T*),Ом

160

80

0

30

0

50

100

*T*0C

Рис. 1. График характеристики термистора

Недостатком кусочно-линейной аппроксимации характеристики является наличие скачков по ее первой производной на границах участков аппроксимации, что вызывает появление помех при необходимости определения производной сигнала, формируемого датчиком.

От этого недостатка свободна аппроксимация характеристики датчика параболической или кубической сплайн-функцией, которая не имеет скачков по производной на границах участков аппроксимации характеристики, к тому же сплайн-аппроксимация обеспечивает существенно меньшую погрешность по сравнению с кусочно-линейной аппроксимацией.

Рассмотрим аппроксимацию характеристики термистора (см. рис. 1) параболической сплайн-функцией, коэффициенты которой определяются цифровым фильтром, определяемым выражениями [7]



, (1)



Здесь Δ*T*[*n*] – длина *n*-го участка дискретизации характеристики термистора (см. рис. 1), *R*[*n*] – значение его сопротивления в *n-*й дискретной точке.

Недостатком сплайн-функций является их неопределенность на краевых условиях: как видно из рассмотрения выражений (1), определяющих коэффициенты парабол на каждом участке дискретизации характеристики, сплайн-функция не определена на участках дискретизации с номерами 1, 2, (*n*-2), (*n*-1), *n*.

Для устранения этого недостатка характеристика датчика (в данном случае термистора) может быть экстраполирована за границы полного динамического диапазона датчика с помощью какого-либо выражения.

При экстраполяции характеристики термистора с помощью выражения [6]

 (2)

где *А*= 3,063·10-2, *B* = 1,57·10-3, *C* = 3,43·10-5, *D*= 4,8·10-7, *E*= 2,6·10-9, *F*= 2,27·10-11, *G*= -2,64·10-14, на более широкий температурный диапазон (‑27…+150) °С сплайн-аппроксимация характеристики, изображенной на рис. 1, при 30 участках дискретизации практически совпадает с самой характеристикой.

Длина участков дискретизации (закон дискретизации) в данном случае определялась выражением

 (3)

где  – дискретное изменение функции *R*(*T*) при предварительном равномерном разбиении диапазона температур на 50 дискретных участков;

*Тmin* – нижняя граница диапазона температур;

– длина дискретного участка в районе *Тmin*;

*k* – коэффициент в пределах 0,05…1.

Как видно из (2), длина участка дискретизации в данном случае обратно пропорциональна производной характеристики термистора (см. рис. 1).

Следует отметить, что закон дискретизации (2) может быть произвольным, на практике точки дискретизации могут определяться таблицей метрологической аттестации конкретного датчика.

Зависимость относительной погрешности аппроксимации характеристики термистора от температуры для диапазона (-30…+10) °С при использовании описанного выше алгоритма сплайн-аппроксимации, а также аналогичная зависимость при кусочно-линейной аппроксимации при 30 участках дискретизации представлены на рис. 2. Погрешность аппроксимации характеристики в диапазоне температур 10…100 °С пренебрежимо мала.

Как видно из рассмотрения рис. 2, погрешность аппроксимации при использовании сплайн-функции примерно в 3 раза меньше аналогичной погрешности при использовании кусочно-линейной аппроксимации при том же числе дискретных участков на полном динамическом диапазоне датчика-термистора.

Сам алгоритм сплайн-аппроксимации, определяемый выражениями (1), достаточно просто реализуется современными микропроцессорными контроллерами.

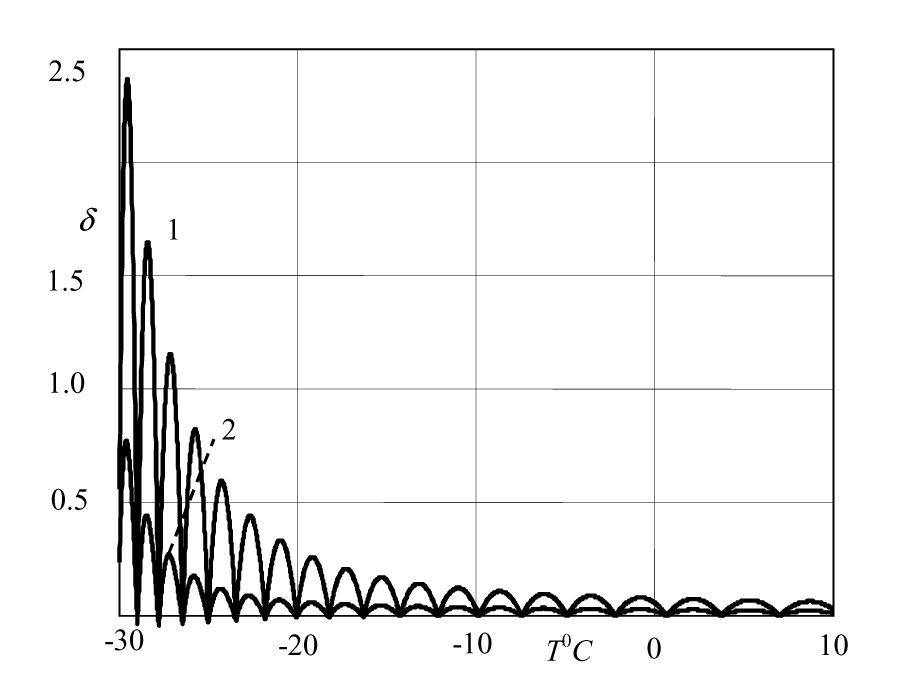


Рис. 2. Зависимости относительной погрешности аппроксимации характеристики   
термистора при переменной дискретизации и 30 участках дискретизации:

1 – при использовании параболической сплайн-аппроксимации;

2 – при использовании кусочно-линейной аппроксимации

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ланге П.К., Платонов И.А., Унгаров М.Б.* Коррекция нелинейности характеристик датчиков с использованием аппроксимации // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 3(43). – С. 53–57.
2. Датчики теплофизических и механических параметров: Справочник. Т. 1, кн. 1 / Под общ. ред. *Коптева Ю.Н.*, под ред. *Багдатьева Е.Е., Гориша А.В., Малкова Я.В. –* М.: ИПЖР, 1998.
3. *Обвинцева Л.А.* Полупроводниковые металлооксидные сенсоры для определения химически активных газовых примесей в воздушной среде // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. LII. – № 2. – С. 113–121.
4. *Суханова Н.Н., Суханов В.И., Юровский А.Я.* Полупроводниковые термопреобразователи с расширенным диапазоном рабочих температур // Датчики и системы. – 1999. – № 7, 8.
5. *Ланге П.К.,* *Унгаров М.Б.* Кусочно-линейная аппроксимация характеристики терморезистивных датчиков с использованием неравномерной дискретизации // Информационно-измерительные и управляющие системы: Сб. – Самара: СамГТУ, 2014. – Вып. 1(9). – С. 45–50.
6. *Мэклин Э.Д.* Терморезисторы. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
7. *Ланге П.К.* Сплайн-аппроксимация дис­кретных значений сигналов с применением методов цифровой фильтрации // Сб. труд. Самарского гос. тех. ун-та. Сер. Физ.-мате­м. науки. – Самара: СамГТУ, 2003. – Вып. 19. – С. 134–138.

*Статья поступила в редакцию 14 июня 2017 г.*

CORRECTION OF THE DYNAMIC ERROR OF INERTIAL SENSORS

P.K. Lange [[6]](#footnote-6)

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*The method of dynamic error correction for inertia sensor having a transfer function type aperiodic operator of the first order is considered. The method is based on the realization of the inverse sensors operator in a dynamic mode. Correction method uses a parabolic spline-approximation of discrete values of sensors signal, as well as its first derivative. An example of correction of the signal formed by the inertia sensor of a particular type is described. It is shown that the use of a mathematical correction method based on digital filter in-line processing of discrete signal values allows to reduce in several times the dynamic error of inertia sensor. It is proposed to use the method described above also for the correction of the sensors signal, the operator of which having the second order. The considered method can be easily implemented using modern microprocessor measuring systems.*

**Keywords:** sensor, inertia, frequency response, transfer function, measured parameter, dynamic error, spline-approximation.

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

   *Петр Евгеньевич Подлипнов, младший научный сотрудник.* [↑](#footnote-ref-1)
2. *Следует отметить, что согласие конструкторов ГТД на выполнение всего двух установочных отверстий для ОВТД, образующих кластер, с выполнением необходимых условий на расстояние между ними и угол разворота ЧЭ [2], а также использование самокомпенсации температурных воздействий в каждом измерительном канале позволяют избавиться от влияния обоих видов МФ, обеспечив пользователя информацией о координатах y (РЗ) и x (осевые смещения).* [↑](#footnote-ref-2)
3. *Для компрессорной лопатки длина хорды спинки и корыта [4, 7, 8] составила 29 мм; ширина выходной и входной кромок 2,0 мм; выступов в торцевой части лопатки нет (в модели равны нулю); степень кривизны лопатки определяется изгибом ее спинки и корыта относительно центра хорды и составляет 0,1 мм.* [↑](#footnote-ref-3)
4. *Marina M. Kuteynikova (Ph.D. (Techn.)), Senior Scientist.*

   *Petr E. Podlipnov, Scientist.* [↑](#footnote-ref-4)
5. *\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-08-00252 А.*

   *Петр Константинович Ланге (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».* [↑](#footnote-ref-5)
6. *Petr K. Lange* *(Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*  [↑](#footnote-ref-6)