

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.518

ПОГРЕШНОСТИ ДИСКРЕТИЗАЦИИ В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ И ОСЕВЫХ СМЕЩЕНИЙ ТОРЦОВ ЛОПАТОК РАБОЧЕГО КОЛЕСА ТУРБИНЫ¹

С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев

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

Исследуются погрешности дискретизации системы измерения радиальных и осевых смещений торцов турбинных лопаток сложной формы, в которой реализованы кластерные методы измерения, предусматривающие применение одновитковых вихретоковых датчиков с чувствительными элементами в виде отрезка проводника. Приводятся результаты исследований погрешности дискретизации в заданных диапазонах изменений частоты импульсного питания и скорости вращения рабочего колеса. Получены результаты аналогичных исследований, отличающихся применением в системе алгоритмов аппроксимации дискретных отсчетов в окрестности экстремума и вычисления экстремальных значений. Показано, что применение алгоритмов аппроксимации выбранных значений кодов с последующим вычислением экстремальных значений полученной аппроксимирующей функции позволяет существенно уменьшить максимально возможные погрешности.

Ключевые слова: лопатки сложной формы, одновитковый вихретоковый датчик, методы измерения, погрешность дискретизации, период импульсного питания, скорость вращения, аппроксимация.

Известны кластерные методы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах газотурбинных двигателей (сечение в торцевой части таких лопаток плоскостью перпендикулярной оси лопатки имеет ярко выраженную серповидную форму, а плоскостью параллельной ее оси – U-образную из-за наличия выступов боковых поверхностей). Методы предусматривают применение высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника [1], размещаемых непосредственно в проточной части турбины. Два ОВТД образуют кластер, причем рассматриваемые методы отличаются

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-00802).

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

Марина Михайловна Кутейникова, научный сотрудник.

Юрий Николаевич Секисов (д.т.н.), заведующий лабораторией.

Олег Петрович Скобелев (д.т.н., проф.), главный научный сотрудник.

местом размещения кластера относительно торцевой части лопатки и углом разворота ЧЭ относительно направления вращения рабочего колеса с установленными на нем лопатками.

Согласно первому методу (meth 1) ОБТД размещаются вблизи хвостовой части лопатки, а ЧЭ развернуты на угол $30 \div 60$ град. против часовой стрелки относительно направления вращения рабочего колеса. При этом прохождение лопаткой ЧЭ сопровождается уменьшением индуктивности ЧЭ и ее минимум является информативным параметром [2, 3].

В соответствии со вторым методом (meth 2) ОБТД размещены вблизи головной части лопатки, а ЧЭ развернуты на 60 град. по часовой стрелке относительно направления вращения рабочего колеса, причем прохождение лопаткой ЧЭ сопровождается «эффектом двоения» минимальных значений индуктивности ЧЭ и в качестве информативного параметра выбирается наименьший из двух минимумов [4, 5].

При этом преобразование индуктивности ЧЭ в напряжение и цифровой код завершается к моменту окончания импульса питания измерительной цепи (ИЦ) с включенными в нее ОБТД и вновь повторяется в ответ на следующий импульс через время T_n – период их следования или шаг дискретизации преобразуемой индуктивности ЧЭ. В идеале, т. е. при $T_n \rightarrow 0$, экстремальные значения кодов соответствуют информативным минимумам индуктивностей ЧЭ.

В реальных условиях вполне ожидаемо появление погрешности дискретизации при увеличении шага дискретизации (T_n) и дополнительный ее рост при увеличении скорости вращения рабочего колеса. Однако количественные оценки таких погрешностей, связанных с изменением периода импульсного питания (его частоты), а также скорости вращения рабочего колеса, в публикациях, посвященных кластерным методам и средствам измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в турбине, до сих пор отсутствуют. Настоящая статья призвана восполнить существующий пробел.

В статье уточняется определение погрешности дискретизации применительно к кластерным методам и их реализациям, приводятся результаты исследований погрешности дискретизации в заданных диапазонах изменений частоты импульсного питания и скорости вращения рабочего колеса в предположении использования в системе измерения как meth 1, так и meth 2. Кроме того, получены результаты аналогичных исследований, отличающихся применением в системе алгоритмов аппроксимации дискретных отсчетов в окрестности экстремума и вычисления экстремальных значений.

Погрешности дискретизации

Если период повторения импульсов питания (T_n) и их длительность (Δt) минимальны ($T_n, \Delta t \rightarrow 0$), то функции изменения кодов АЦП во времени $C(t)$ можно считать практически непрерывными (однако труднореализуемыми и существующими только в идеале).

Рис. 1 иллюстрирует процесс дискретизации с конечным шагом T_n , отличающимся по величине в предположении одинаковой скорости вращения рабочего колеса (рис. 1, а, б), и, напротив, с постоянным периодом (T_n), но на другой (более высокой) скорости вращения (рис. 1, а, в). Предполагается также, что в ИЦ и системе измерения реализован meth 1. Идеализированные функции $C(t)$ показаны пунктиром, а их экстремумы обозначены C_9^H . Там же показаны дискретные зна-

чения функции, в т. ч. ближайшие по значению к $C_3^{\text{и}}$, причем равноудаленные от него по времени (на $T_{\text{п}}/2$), что соответствует наибольшей разности реальных экстремумов $C_3^{\text{р}}$ и идеального $C_3^{\text{и}}$. Эту разность и предлагается далее использовать для оценки погрешностей дискретизации, связанных с изменениями периода импульсного питания и скорости вращения рабочего колеса:

$$\Delta = C_3^{\text{и}} - C_3^{\text{р}} \quad (1)$$

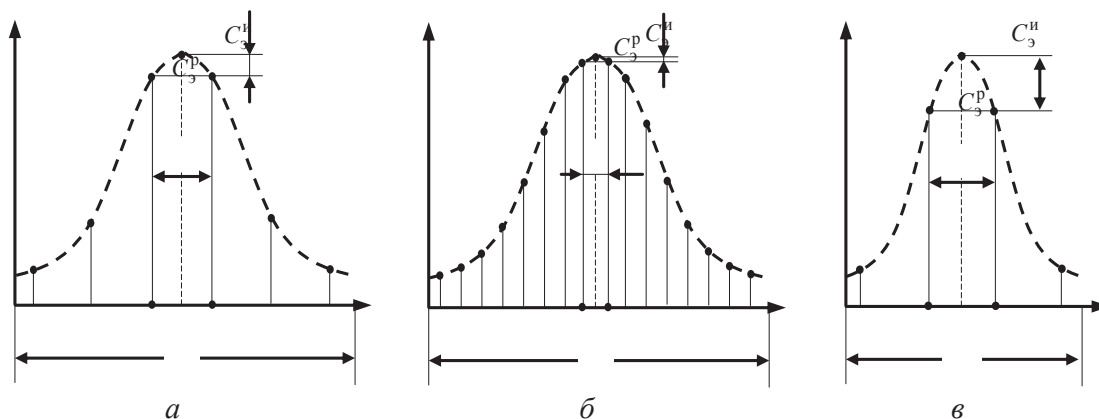


Рис. 1. Погрешности, связанные с изменением периода импульсного питания при постоянной скорости вращения рабочего колеса (а, б) и с изменением скорости его вращения при постоянном периоде импульсного питания (а, в)

Как уже отмечалось, при неизменной скорости вращения рабочего колеса погрешность Δ уменьшается с повышением частоты импульсного питания (уменьшением периода $T_{\text{п}}$) (рис. 1, а, б). Однако погрешность возрастает с повышением скорости вращения рабочего колеса при постоянной частоте (периоде) импульсного питания (рис. 1, а, в).

Вместе с тем (что также отмечалось во введении) при обработке данных, полученных в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток, применяются алгоритмы аппроксимации дискретных отсчетов с выхода АЦП. При этом за информативное значение кода принимается экстремум аппроксимирующей функции ($C_3^{\text{а}}$). Тогда искомая погрешность будет определяться разностью $C_3^{\text{и}}$ и $C_3^{\text{а}}$:

$$\Delta_{\text{а}} = C_3^{\text{и}} - C_3^{\text{а}} \quad (2)$$

Оценки погрешностей по экстремальным значениям кодов без использования аппроксимации

Для исследования семейства функций преобразования (ФП) ИЦ с включенными в нее ОВТД (в составе кластера) используется модель, исходными данными для которой являются результаты моделирования электромагнитного взаимодействия ЧЭ с торцевой частью лопатки [6, 7]². В оценках же искомых погреш-

² ФП ИЦ – зависимости кодов от координат смещений торцов лопаток x, y, z в системе отсчета $OXYZ$, где ось X направлена вдоль оси рабочего колеса, ось Y – в радиальном направлении, а ось Z – в направлении вращения. Начало отсчета (точка O) находится на внутренней поверхности статора.

ностей использованы промежуточные результаты моделирования семейства ФП – зависимости цифровых кодов на выходе ИЦ от координаты z ($C(z)$) для нахождения экстремальных значений этой функции.

Функции $C(z)$, вычисленные на модели ИЦ с очень малым шагом по времени (эквивалент в линейном выражении по z до 0,05 мм), можно считать идеальными ($C^и(t)$), а их экстремумы $C_3^и$. Вместе с тем, функции $C^и(t)$ можно использовать для определения дискретных значений кода при любом выбранном шаге дискретизации, включая коды $C_3^р$.

На рис. 2 в безразмерном виде представлена зависимость $C^и(z)/C_3^и$, полученная на модели ИЦ (предполагается, что в ИЦ реализован meth 1). Рабочее колесо имеет радиус 0,5 м, число лопаток – 100, скорость вращения изменяется от 3000 до 21000 об/мин, а частота импульсного питания – от $1 \cdot 10^6$ до $10 \cdot 10^6$ Гц (период (T_n) от $1 \cdot 10^{-6}$ до $0,1 \cdot 10^{-6}$ с).

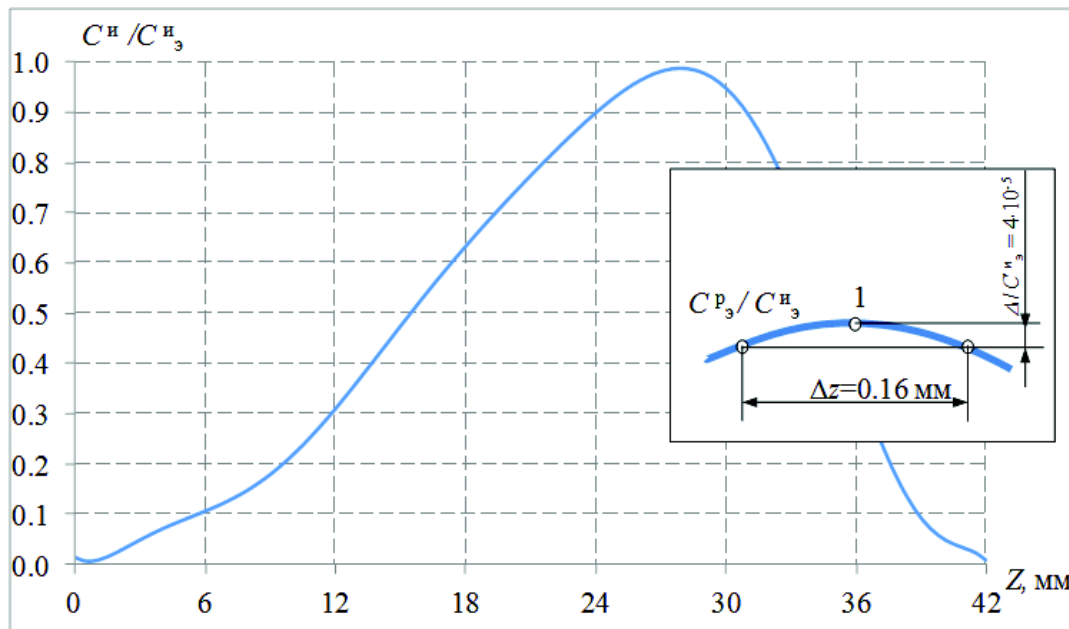


Рис. 2. Зависимость $C^и(z)/C_3^и$ (meth 1) и пример количественной оценки погрешности $\Delta/C_3^и$ («аппликация»)

Пусть скорость вращения рабочего колеса 3000 об/мин. Тогда период вращения $T_0 = 20 \cdot 10^{-3}$ с, а время τ_0 равно $200 \cdot 10^{-6}$ с, причем в линейном выражении τ_0 соответствует шагу установки лопаток $z_n = 31,4$ мм.

Если частота импульсного питания $1 \cdot 10^6$ Гц и период T_n (т. е. шаг дискретизации) составляет $1 \cdot 10^{-6}$ с, то число отсчетов k за время τ_0 составит 200, а шаг дискретизации в линейном выражении будет равен $\Delta z = z_n/k$, т. е. 0,16 мм. Для найденного шага ($\Delta z_1 = 0,16$ мм) на функции $C^и(z)/C_3^и$ (рис. 2) в соответствии с рис. 1 и формулой (1) вычисляется максимальная приведенная погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta}{C_3^и} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Для указанных выше исходных данных и приведенных результатов моделирования погрешность $\delta=0,004\%$ (рис. 2, «аппликация»).

Результаты расчета погрешности δ для остальных значений частоты импульсного питания ($f_{\text{п}}$) и скорости вращения рабочего колеса ($n_{\text{рк}}$) в указанных ранее диапазонах изменений представлены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что при реализации meth 1 погрешность δ невелика и даже при минимальной частоте $f_{\text{п}}$ и наибольшей скорости вращения $n_{\text{рк}}$ не превышает $0,23\%$. При этом увеличение погрешности связано с увеличением шага дискретизации в линейном выражении до $1,1\text{ мм}$.

Аналогичные исследования погрешностей, связанных с изменениями $f_{\text{п}}$ и $n_{\text{рк}}$, были проведены в предположении реализации meth 2.

На рис. 3 представлена функция $C^{\text{и}}(z)/C_3^{\text{и}}$, полученная на модели ИЦ (meth 2) для условий, когда наблюдается максимальный «разбаланс» экстремальных значений, причем наибольший из экстремумов характеризуется самыми крутыми фронтами и острой вершиной, что, в свою очередь, приводит к увеличению искомых погрешностей.

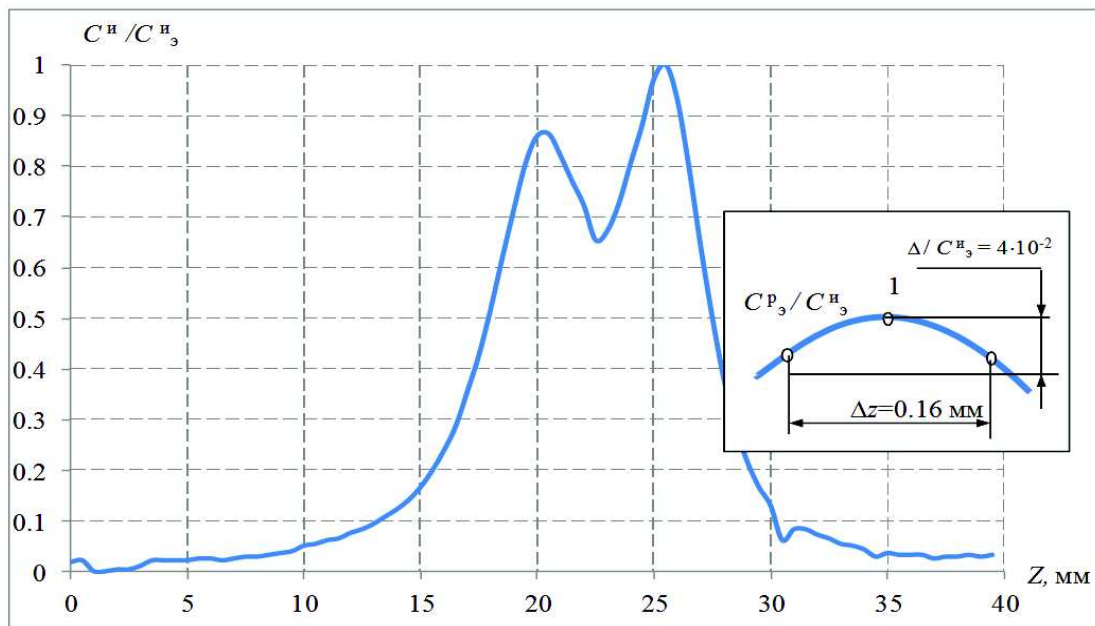


Рис. 3. Зависимость $C^{\text{и}}(z)/C_3^{\text{и}}$ (meth 2) и пример количественной оценки погрешности $\Delta/C_3^{\text{и}}$ («аппликация»)

Расчет погрешностей выполнялся для тех же значений исходных данных, что и для meth 1, в т. ч. для частоты $f_{\text{п}}$ и скорости вращения $n_{\text{рк}}$. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Из табл. 2, как и ожидалось, видно уменьшение погрешности δ с увеличением $f_{\text{п}}$ и, напротив, ее рост с повышением скорости вращения $n_{\text{рк}}$. Однако максимум погрешности при реализации meth 2 достигает примерно $4\%^3$ и более чем на порядок превышает аналогичную погрешность при реализации meth 1.

³ Эта же погрешность ($\Delta/C_3^{\text{и}} \approx 0,04$) показана на рис. 3 в виде «аппликации».

Таблица 1

Погрешности δ (в %) в зависимости от частоты f_n и скорости вращения n_{pk} (meth 1)

n_{pk} об/мин	f_n , Гц		
	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
3000	0,004	0,0003	0,000004
6000	0,002	0,002	0,0001
9000	0,004	0,004	0,0003
12000	0,007	0,008	0,001
15000	0,12	0,001	0,001
18000	0,17	0,002	0,001
21000	0,23	0,003	0,002

Таблица 2

Погрешности δ (в %) в зависимости от частоты f_n и скорости вращения n_{pk} (meth 2)

n_{pk} об/мин	f_n , Гц		
	$1 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$10 \cdot 10^6$
3000	0,08	0,01	0,00004
6000	0,33	0,03	0,002
9000	0,75	0,08	0,01
12000	1,33	0,14	0,01
15000	2,06	0,23	0,02
18000	2,93	0,33	0,03
21000	3,93	0,45	0,04

Оценка погрешностей при использовании алгоритмов аппроксимации кодов

Для оценки таких погрешностей используются те же результаты моделирования ИЦ, представленные в виде зависимостей $C^u(z)/C_3^u$ на рис. 2 (meth 1) и рис. 3 (meth 2). По ним же определяются как экстремальные значения, так и значения выбранных кодов, найденных для вычисляемых значений шага дискретизации в линейном выражении, полученные по заданным частотам импульсного питания (f_n) и скоростям вращения рабочего колеса (n_{pk}) (см. табл. 1, 2).

Для аппроксимации выбранных кодов в ИЦ и системе измерения, реализующей meth 1, в работе [8] предлагается использовать алгоритм, предусматривающий применение ортогональных полиномов Чебышева I рода. Погрешность вычисляется по формуле (3), где вместо Δ согласно (2) подставляется Δ_a .

Результаты расчетов показывают, что погрешность δ сравнительно равномерно распределена в диапазоне изменений частоты f_n от $1 \cdot 10^6$ до $10 \cdot 10^6$ Гц и скорости n_{pk} от 3000 до 21000 об/мин и не превышает 0,006 % (максимально возможная погрешность δ без использования алгоритма аппроксимации была в десятки раз больше, достигая 0,23 %).

Для аппроксимации выбранных кодов в ИЦ и системе измерения, реализующих meth 2, в работе [9] предлагается алгоритм, предусматривающий использование в качестве аппроксимирующей функции квадратичной параболы с последующим аналитическим определением координат ее экстремального значения (вершины параболы). Расчет погрешности δ ведется по формуле (3) аналогично расчетам, приведенным выше (при тех же исходных данных, включая f_n и n_{pk}). Его результаты, представленные на рис. 4 в виде графиков функций $\delta(f_n, n_{pk})$, показывают снижение погрешностей δ на несколько порядков (до 0,07 %) на минимальной частоте f_n и максимальной скорости вращения n_{pk} . Для наглядности на том же рис. 4 совмещены графики функций $\delta(f_n, n_{pk})$, полученные с использованием аппроксимации и без нее.

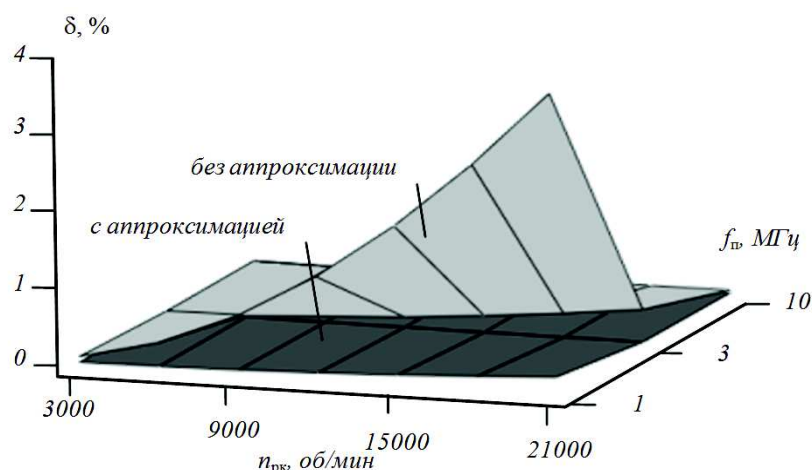


Рис. 4. Погрешность $\delta(f_{\text{п}}, n_{\text{рк}})$ при использовании аппроксимации и без нее (meth 2)

В то же время следует отметить, что применительно как к meth 1, так и к meth 2 на малых скоростях вращения (до 3000 об/мин) и частоте питания выше 3 МГц вряд ли целесообразно применение алгоритмов аппроксимации, так как выигрыш в точности определения экстремума будет небольшим при значительном усложнении обработки данных и сопутствующем увеличении требуемых вычислительных ресурсов и временных затрат.

Заключение

Исследованы погрешности дискретизации системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, в которой реализованы кластерные методы измерения (meth 1 и meth 2), предусматривающие применение ОВТД с ЧЭ в виде отрезка проводника. Искомые погрешности определяются как разность экстремальных значений цифровых кодов, полученных в идеальной ИЦ (с периодом и длительностью импульсов питания, стремящихся к нулю), и кода в реально существующей ИЦ в процессе моделирования зависимости кодов от координаты z при заданных значениях координат x и y . Показано, что в диапазоне изменения частоты импульсного питания от $1 \cdot 10^6$ до $10 \cdot 10^6$ Гц и скорости вращения рабочего колеса от 3000 до 21000 об/мин погрешности дискретизации не превышают 0,2 % для meth 1 и достигают почти 4 % meth 2. Показано также, что применение алгоритмов аппроксимации выбранных значений кодов с последующим вычислением экстремальных значений полученной аппроксимирующей функции позволяет существенно уменьшить максимально возможные погрешности – до 0,006 % для meth 1 и до 0,07 % для meth 2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кутейникова М.М., Райков Б.К., Скобелев О.П. Конструктивные разновидности высокотемпературных одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XIV Междунар. конф. – Самара: СамНИЦ РАН, 2012. – С. 595–601.
2. Патент 2457432 РФ, МКИ G 01 В 7/14. Способ измерения радиальных зазоров и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины / Бельский Л.Б., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. № 2010154771/28; Заяв. 30.12.10; Оpubл. 27.07.12, бюл. № 21.
3. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.В., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. –

№ 10. – С. 38–46.

4. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной чувствительностью и в расширенном диапазоне // Автометрия. – 2015. – № 3. – С. 104–112.
5. Патент 2556297 РФ, МПК G01B7/14. Способ измерения радиальных зазоров и осевых смещений торцов рабочих лопаток турбины / Кутейникова М.М., Райков Б.К., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. №2013147336/28; Заяв. 23.10.13; Опубл. 10.07.2015, бюл. № 19.
6. 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: СамНЦ РАН, 2014. – С. 692–696.
7. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н., Скобелев О.П. Модель измерительной цепи с переменными во времени эквивалентными индуктивностями одновитковых вихретоковых датчиков // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVI Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2013. – С. 627–635.
8. Белопухов В.Н., Боровик С.Ю. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2013. – С. 650–654.
9. Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Кутейникова М.М. Определение экстремума функции изменения кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVII Междунар. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2015. – С. 679–680.

Статья поступила в редакцию 1 марта 2016 г.

DISCRETIZATION ERRORS IN THE SYSTEMS FOR MEASURING OF TURBINE BLADES TIPS' RADIAL AND AXIAL DISPLACEMENTS⁴

S.Yu. Borovik, M.M. Kuteynikova, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev

Institute for the Control of Complex Systems of Russian academy of sciences
61, Sadovaya st., Samara, 443020, Russian Federation

The discretization errors in the systems for measuring of turbine blades tips' radial and axial displacements are considered. Systems are realized cluster methods that are based on using of single-coil eddy-current sensors with sensitive elements made as a conductor strip. The results of discretization error investigation in the set range of measuring circuit pulse power supply period and turbine impeller's rotation speed are given. The same results, but using a sampling approximation in extremum vicinity and calculating the extremum were obtained too. The results show that using approximation algorithms with further extremum calculating allows for a significant decrease in the highest possible discretization error.

Keywords: complex shaped blades, single-coil eddy-current sensor, measuring methods, discretization error, pulse power supply period, rotation speed, approximation.

⁴ This work was supported by grant #14-08-00802 from the Russian Foundation for Basic Research.

Sergey Yu. Borovik, Doctor of Engineering Sciences, Leading Researcher.

Marina M. Kuteynikova, Research fellow.

Yuriy N. Sekisov, Doctor of Engineering Sciences, Head of Laboratory

Oleg P. Skobelev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Scientist.