

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

УДК681.518.5

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ОСЕВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВАЛА В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАДИАЛЬНО-УПОРНОГО ПОДШИПНИКА ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НК-33 НА ОСНОВЕ ОДНОВИТКОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ДАТЧИКОВ

С.Ю. Боровик¹, В.П. Данильченко^{1,2}, М.М. Кутейникова¹, Ю.Н. Секисов¹

¹ Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт проблем управления сложными системами РАН
(ИПУСС РАН – СамНЦ РАН)
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

² ПАО «ОДК-Кузнецов»
443009, г. Самара, Заводское ш., 29

E-mail: borovik@iccs.ru, vdan26@mail.ru, kuteynikova@iccs.ru, sekisov@iccs.ru

Аннотация. Статья продолжает серию публикаций, посвященных задачам ранней диагностики состояния радиально-упорного подшипника турбонасосного агрегата жидкостного реактивного двигателя НК-33, который является критическим узлом в составе энергосиловой установки. В основе предлагаемого подхода лежит идея замены используемых в агрегате штатных индукционных датчиков частоты вращения ротора турбонасоса распределенным кластером из двух одновитковых вихретоковых датчиков специальной конструкции со смещенными чувствительными элементами в виде отрезка проводника. Преобразователи размещаются в те же монтажные отверстия, что и штатные датчики частоты вращения, а их чувствительные элементы ориентируются относительно зуба измерительного диска, установленного на контролируемом валу таким образом, чтобы при всех возможных перемещениях вала торец зуба находился в зоне чувствительности обоих дат-

Сергей Юрьевич Боровик, ведущий научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, доктор технических наук.

Валерий Павлович Данильченко, ведущий конструктор лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, главный конструктор ПАО «ОДК-Кузнецов», доктор технических наук, профессор.

Марина Михайловна Кутейникова, старший научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, кандидат технических наук.

Юрий Николаевич Секисов, главный научный сотрудник лаборатории систем сбора и обработки многомерной информации ИПУСС РАН – СамНЦ РАН, доктор технических наук, доцент.

чиков. Совокупная обработка выходных сигналов вихретоковых преобразователей при прохождении зуба под чувствительными элементами позволяет определить изменение осевого положения диска, вызванного смещением вала ротора при разрушении радиально-упорного подшипника, а фиксация моментов прохождения торцом зуба измерительного диска геометрических центров чувствительных элементов соответственно первого и второго датчика в составе кластера обеспечивает реализацию штатных функций измерения частоты вращения ротора по основному и дублирующему каналу. Оценке погрешностей измерения осевых перемещений вала в каналах системы контроля состояния радиально-упорного подшипника турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя НК-33, реализующей данный способ, посвящена настоящая статья. В частности, рассматриваются случайные и систематические составляющие основной погрешности, обусловленные воздействием помех, конечной частотой дискретизации и выбранным методом вычисления искоемых перемещений вала в контролируемом узле.

Ключевые слова: жидкостный реактивный двигатель, турбонасосный агрегат, радиально-упорный подшипник, контроль изнашивания, одновитковый вихретоковый датчик, мониторинг осевых перемещений, кластерные методы, погрешности измерения

Введение

Известно, что жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) являются основным типом силовых установок, используемых в современной ракетно-космической технике. Двигатель представляет собой сложную совокупность разнообразных систем и агрегатов, многие из которых отличаются друг от друга по принципу действия и относятся к разным классам машин [1].

Обычно в ЖРД источником энергии и рабочим телом для получения тяги является двухкомпонентное химическое топливо, которое подается в камеру с помощью турбонасосного агрегата (ТНА). ТНА также осуществляет смешение горючего и окислителя. Критически важным элементом ТНА, испытывающим значительные механические нагрузки, является радиально-упорный подшипник (РУП), который обеспечивает положение ротора турбонасоса относительно статора, воспринимает осевое давление ротора и не допускает его перемещений в направлении собственной оси [2]. Очевидно, что с учетом непосредственной близости в ТНА топлива и окислителя выход из строя и разрушение элементов его конструкции и, в частности, РУП может привести к катастрофическим последствиям как для силовой установки, так и для ракеты-носителя в целом [3].

Одним из представителей ЖРД большой тяги, работающих на двухкомпонентном топливе, является разработанный в конце 60-х годов прошлого столетия для лунной программы Н1-Л3 однокамерный ракетный двигатель многократного применения НК-33 с тягой более 100 тс [4]. Выполненный по замкнутой схеме на компонентах кислород – керосин, НК-33 имеет многоразовый запуск и считается одним из наиболее надежных ракетных двигателей в мире [4, 5]. В то же время, судя по [3], аварийные ситуации все равно остаются возможными, в том числе и по причине разрушения РУП. В современных модификациях НК-33 для уменьшения изнашивания РУП ТНА применяется автомат его разгрузки от осевых сил, однако какие-либо средства контроля состояния подшипника отсутствуют.

С учетом невозможности внесения каких-либо конструктивных изменений в готовую конструкцию ТНА НК-33 в работе [6] было предложено оригинальное

решение задачи контроля износа РУП на основе замены штатных индукционных датчиков частоты вращения (ДЧВ) ротора ТНА, используемых в основном и дублирующем каналах измерения частоты вращения вала в системе управления силовой установкой, на идентичные по габаритам одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) специальной конструкции со смещенными чувствительными элементами в виде отрезка проводника [7], образующими распределенный кластер ОВТД, размещаемыми в те же монтажные отверстия, что и штатные ДЧВ, и обеспечивающими помимо измерения частоты вращения ротора ТНА определение осевого перемещения вала в РУП, вызванного износом подшипника. В последнем случае реализуется один из вариантов известного метода измерения x, y -координат смещений элементов конструкций энергосиловых установок с помощью распределенного кластера ОВТД [8]. Однако в отличие от традиционного применения метода для решения задач измерения y -координаты (например, радиальных зазоров между статорной оболочкой и торцами лопаток компрессора или турбины авиационного двигателя) в условиях мешающего воздействия осевых перемещений ротора (x -координаты) в рассматриваемом случае решается обратная задача, где в качестве полезной информации выступает осевое перемещение (x -координата) измерительного диска, установленного на валу ротора ТНА, а изменения радиального зазора между чувствительным элементом ОВТД и торцевой поверхностью диска (y -координаты), обусловленные температурными и упругими деформациями контролируемого объекта в рабочем режиме, – наоборот, являются мешающими факторами, затрудняющими получение искомой информации [9].

В работах [2, 6, 10] приводятся описания технических средств, алгоритмического и программного обеспечения прототипа системы контроля состояния РУП ТНА НК-33, реализующей указанный выше подход. Общая работоспособность системы была подтверждена в лабораторных условиях. В то же время работы, посвященные исследованиям метрологических характеристик измерительных каналов системы, в настоящее время отсутствуют. Предлагаемая публикация призвана устранить указанный пробел. В статье приводятся оценки погрешностей измерения осевых перемещений вала в каналах системы контроля состояния РУП ТНА НК-33 и, в частности, рассматриваются случайные и систематические составляющие основной погрешности, обусловленные воздействием помех, конечной частотой дискретизации и выбранным методом вычисления искомых перемещений вала в контролируемом узле. Собственно анализу результатов оценки указанных составляющих основной погрешности предшествует описание лабораторного оборудования, использованного для указанных целей.

Лабораторное оборудование

В качестве основного оборудования для проведения метрологических экспериментов использовался специально разработанный лабораторный стенд, внешний вид которого представлен на рис 1, *а* [2]. Детальное изображение блока, содержащего измерительный диск и имитатор статора с установленными на нем ОВТД, а также устройство контроля осевых перемещений диска приведены на рис. 1, *б*, *в* соответственно.

В состав стенда входит электродвигатель (1) с регулируемой скоростью вращения вала. На валу электродвигателя жестко закреплен измерительный диск (2) с двумя диаметрально расположенными выступами, идентичный применяемому в существующей конструкции ТНА для контроля частоты вращения ротора тур-

бонасоса. Кластер ОВТД (3) вмонтирован в имитатор корпуса ТНА (4), который, в свою очередь, установлен на координатно-подвижной каретке (5), обеспечивающей перемещение имитатора статора относительно измерительного диска в вертикальном (радиальном) и горизонтальном (осевом) направлениях. Указанные перемещения осуществляются с помощью маховиков (6, 7) и имитируют, по сути, искомое осевое смещение вала, вызванное разрушением РУП, а также изменение взаимного положения выступов измерительного диска и чувствительных элементов ОВТД в составе кластера, обусловленные наличием упругих и температурных деформаций элементов конструкции ТНА, возникающих в рабочем процессе эксплуатации агрегата в составе ЖРД. Контроль перемещений имитатора статора относительно измерительного диска осуществляется с помощью механических индикаторов часового типа (8, 9) с разрешающей способностью 10 мкм.

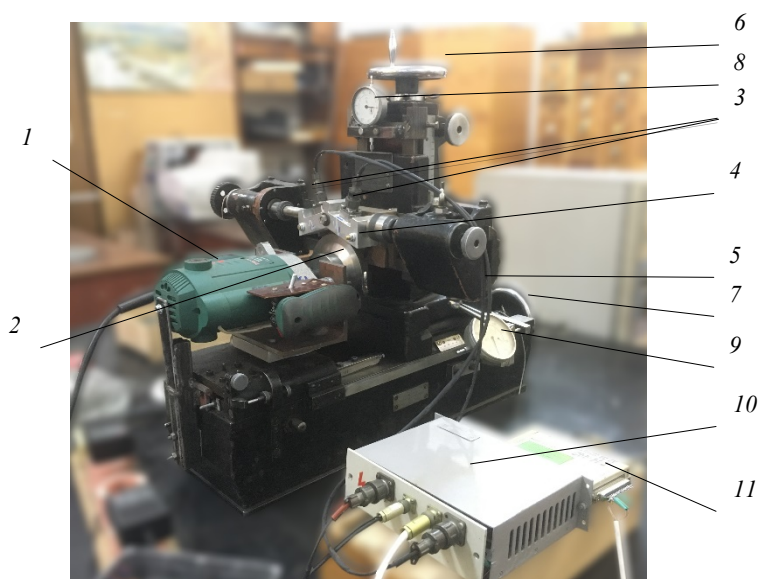
ОВТД подключены к блоку преобразования, усиления и нормализации сигналов (10), который работает в паре с 14-разрядным выносным модулем АЦП E14-440 (11) фирмы L-Card, используемым для ввода измерительной информации в ПЭВМ [11]. Внутреннее программное обеспечение (ПО) ПЭВМ в соответствии с алгоритмами [10] реализует функции настройки измерительных каналов системы, выбора режима работы (служебный или рабочий), управление сбором, преобразованиями и отображением информации, а также обеспечивает человеко-машинный интерфейс взаимодействия с пользователем.

В статическом режиме при заблокированном положении выступа измерительного диска под одним из ОВТД лабораторный стенд может использоваться как градуировочное устройство для получения градуировочных характеристик измерительных каналов с последующим проведением метрологических экспериментов с целью оценки погрешностей измерительных каналов системы. В динамике, при вращении измерительного диска от электродвигателя, стенд применяется для проверки работоспособности и подтверждения характеристик системы на рабочих режимах.

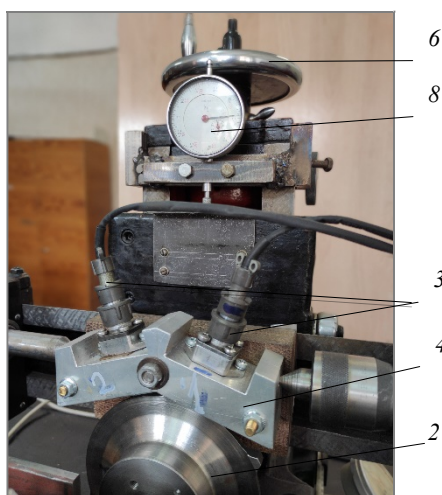
Оценка случайной составляющей погрешности измерения

Эксперименты по оценке случайной составляющей погрешности проводились в статике при фиксированном положении измерительного диска относительно ОВТД, когда выступы на диске находились вне зоны чувствительности обоих датчиков в составе кластера. Объем выборки определялся объемом буферной памяти, используемой в ПО. Коды АЦП регистрировались в режиме непрерывного импульсного питания измерительной цепи (ИЦ) с включенными в нее ОВТД и оценивался их разброс (отклонение кодов от средних значений).

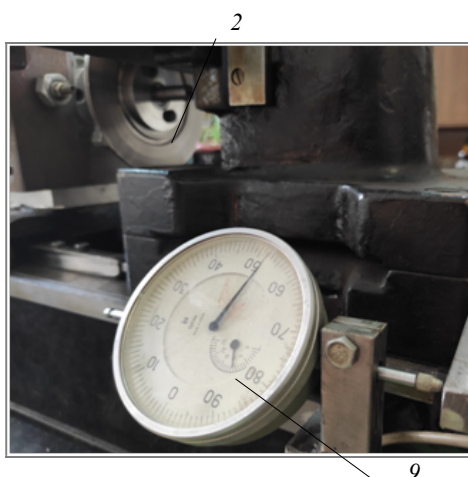
На рис. 2 представлен фрагмент выборки кодов (C_i) объемом 150 отсчетов, полученный при опросе измерительного канала с ОВТД₁. Анализ показал, что большая часть кодов не выходит за пределы разброса в ± 4 единицы. СКО составило 3,09 единицы. Его относительное значение, приведенное к диапазону изменений выходных кодов (1332 единицы кода), составило 0,23 %. Аналогичные результаты были получены и для измерительного канала с ОВТД₂.



a



б



в

Рис. 1. Лабораторный стенд для экспериментальных исследований прототипа системы контроля состояния РУП ТНА:

внешний вид (*a*), имитатор корпуса ТНА с установленными ОВДТ (*б*), устройство контроля осевых перемещений вала (*в*): 1 – электродвигатель с регулируемой частотой вращения;

2 – измерительный диск; 3 – кластер из двух ОВДТ; 4 – имитатор статора;

5 – координатно-подвижная каретка; 6–7 – маховики, обеспечивающие перемещение имитатора статора в вертикальном (6) и горизонтальном (7) направлениях; 8–9 – индикаторы часового типа для контроля перемещений имитатора статора в вертикальном (8)

и горизонтальном (9) направлениях, 10 – блок преобразования, усиления и нормализации сигналов ОВДТ, 11 – выносной модуль АЦП



Рис. 2. Фрагмент выборки кодов C_i , полученный экспериментально

Традиционным способом уменьшения случайной составляющей погрешности является усреднение результатов многократных измерений. В частности, как показано на рис. 2 (темная линия), при использовании усреднения всего по 10 отсчетам максимальный разброс кодов уменьшился до $\pm 2,5$ единицы и СКО составило 1,1 единицы. В относительных единицах приведенная к диапазону изменений выходных кодов случайная погрешность уменьшилась почти втрое и составила 0,08 %.

Составляющие систематической погрешности

Как отмечалось во введении, в системе контроля состояния РУП ТНА НК-33 реализуется один из вариантов кластерного метода измерения x, y -координат смещений торцов лопаток и лопастей [8], в котором в качестве полезной информации выступает осевое перемещение зуба измерительного диска (x -координата) в условиях мешающих изменений радиального зазора между чувствительным элементом ОВТД и торцевой поверхностью диска, возникающих на рабочих режимах работы ТНА и обусловленных воздействием на элементы конструкции ротора центробежных сил и температуры [9]. Суть метода сводится к фиксации напряжения на выходе ИЦ с обоими ОВТД при прохождении торцом зуба измерительного диска зон чувствительности датчиков, аналого-цифрового преобразования напряжения в цифровой код с последующим выделением экстремумов кодов и вычислением искомого осевого перемещения диска и, соответственно, вала ротора ТНА путем решения системы уравнений на основе предварительно снятых градуировочных характеристик (ГХ) вида

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

где C_1, C_2 – цифровой код, соответствующий экстремальному значению амплитуды напряжения на выходе ИЦ с ОВТД₁, ОВТД₂ при прохождении зуба на измерительном диске под чувствительными элементами датчиков, x – искомое осевое перемещение вала в РУП, y – перемещения торца зуба в радиальном направлении, обусловленные упругими и температурными деформациями элементов конструкции ротора.

Очевидно, что в реальных условиях с учетом конечной частоты аналого-цифрового преобразования вполне ожидаемо появление погрешности дискретизации и дополнительный её рост при увеличении скорости вращения измерительного диска. В работах [12, 13] приводятся оценки указанной составляющей

погрешности применительно к задачам измерения радиальных зазоров в компрессорах и турбинах ГТД. В то же время конструкция измерительного диска и режим работы ТНА существенно отличаются от лопаточного колеса и условий функционирования ГТД, что требует проведения отдельных исследований для данного класса силовых установок. Оценки погрешности дискретизации применительно к задаче измерения осевых перемещений вала в РУП с учетом используемых средств аналого-цифрового преобразования и рабочей частоты вращения ротора ТНА приведены ниже.

На рис. 3 схематично представлен процесс дискретизации сигнала на выходе ИЦ с ОВТД для минимальной (рис. 3, а) и номинальной (рабочей) (рис. 3, б) скоростей вращения ротора ТНА с учетом постоянной конечной частоты аналого-цифрового преобразования (период следования импульсов $T_{\text{АЦП}}$).

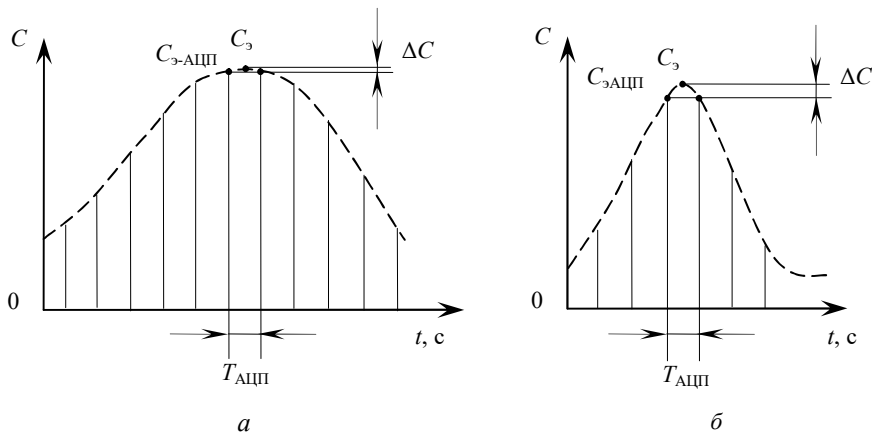


Рис. 3. Погрешность, связанная с изменением скорости вращения ротора ТНА от минимальной (а) до номинальной (б) при постоянной частоте аналого-цифрового преобразования сигнала на выходе ИЦ с ОВТД

Идеализированные функции изменения кодов АЦП во времени $C(t)$ показаны пунктиром, а их экстремальные значения обозначены $C_{\text{э}}$. На тех же рис. 3, а, б показаны дискретные значения функции $C(t)$, полученные в результате аналого-цифрового преобразования выходного сигнала ИЦ. Ближайшие по значению к $C_{\text{э}}$ отсчеты обозначены $C_{\text{э-АЦП}}$. Наибольшая разность между реальным экстремумом $C_{\text{э-АЦП}}$ и идеальным $C_{\text{э}}$ будет в случае, когда соседние дискретные отсчеты в окрестности $C_{\text{э}}$ будут равноудалены от $C_{\text{э}}$ по времени. Эта разность рассматривается далее как погрешность дискретизации, связанная с изменениями скорости вращения ротора ТНА:

$$\Delta C = C_{\text{э-АЦП}} - C_{\text{э}}. \quad (2)$$

На рис. 4 приведен чертеж используемого в ТНА измерительного диска¹ с двумя выступами и указанием основных размеров. Внутренний диаметр диска равен 125 мм, высота измерительного выступа – 7 мм, ширина торцевой части выступа – 5 мм. Как уже отмечалось, в качестве АЦП в прототипе системы контроля РУП используется 14-разрядный выносной модуль E14-440 фирмы L-Card

¹ Внешний вид диска, установленного на валу имитатора ротора ТНА, представлен на рис. 1, а, б, поз. 2.

[11], который работает с максимальной частотой преобразования, равной 400 кГц. Предполагалось, что минимальная частота вращения ротора ТНА была равной 8000 об/мин, а номинальная – 20000 об/мин.

Количество цифровых отсчетов АЦП, приходящихся на зуб измерительного диска в процессе его вращения, можно определить в соответствии с выражением

$$N = \frac{l_{\text{зуб}}}{l_{\text{отсч}}}, \quad (3)$$

где $l_{\text{зуб}}$ – ширина торцевой части зуба, $l_{\text{отсч}}$ – расстояние, которое проходит измерительный диск при вращении с заданной скоростью за период времени между двумя соседними отсчетами АЦП:

$$l_{\text{отсч}} = \frac{\pi d_{\text{max}} V_{\text{д}}}{60 \cdot f_{\text{АЦП}}}, \quad (4)$$

где d_{max} – внешний диаметр измерительного диска, равный расстоянию между торцами двух расположенных диаметрально противоположно зубьев, $V_{\text{д}}$ – скорость вращения измерительного диска в об/мин, $f_{\text{АЦП}}$ – частота аналого-цифрового преобразования напряжения на выходе ИЦ с ОВТД в Гц.

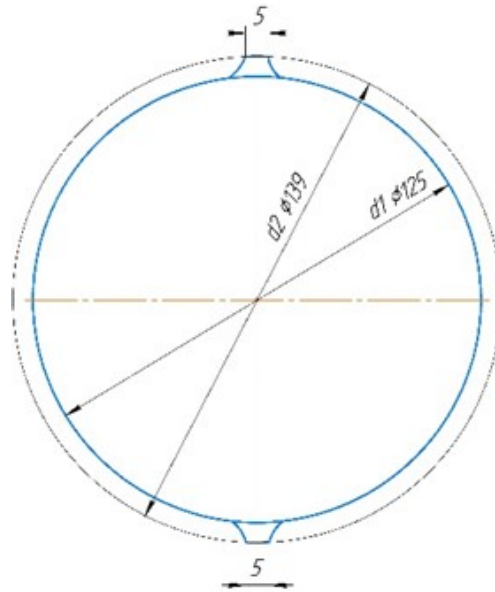


Рис. 4. Измерительный диск с выступами

Тогда для рассматриваемого диска с максимальным диаметром $d_{\text{max}} = 139$ мм и шириной зуба $l_{\text{зуб}} = 5$ мм (см. рис. 3) с учетом частоты преобразования АЦП, равной 400 кГц, в процессе опроса измерительного канала с ОВТД при прохождении зуба зоны чувствительности датчика будет получено 34 цифровых отсчетов кода, если диск вращается с частотой 8000 об/мин, и, соответственно, 13 – при вращении диска с частотой 20000 об/мин.

В качестве идеализированной функции изменения кодов $C(t)$ использовалась аппроксимационная математическая модель, пересчитанная к виду $C(z)$, где z – координата перемещения торца зуба в зоне чувствительности ОВТД в направлении вращения измерительного диска в системе координат $OXYZ$, центр которой привязан к геометрическому центру чувствительного элемента ОВТД. В основе

модели лежат реальные результаты опроса измерительных каналов прототипа системы контроля состояния РУП, полученные на лабораторном стенде рис. 1. Для ее построения с помощью координатно-подвижной каретки имитатор статора с закрепленными на нем ОВТД (рис. 1, а, б, поз. 4, 3) устанавливался над измерительным диском (рис. 1, а, б, поз. 2) таким образом, чтобы зуб находился на равном расстоянии относительно геометрических центров чувствительных элементов обоих ОВТД (осевое смещение диска в этом случае принимается равным «0»), а величина радиального зазора между чувствительными элементами датчиков и зубом была равной 0,75 мм. С помощью электродвигателя (рис. 1, а, поз. 1) диск приводился во вращение с минимально возможной для него частотой. В указанных условиях опрос измерительных каналов с ОВТД осуществлялся с минимально возможным шагом по z (эквивалентно минимальному шагу по t). Результаты опроса для ОВТД₁ в виде зависимости $C(z)$ при прохождении торцом зуба зоны чувствительности датчика аппроксимировались степенным полиномом вида

$$C(z) = -75993708.74 + 14010849.38z - 1072967.246z^2 + \\ + 43696.16509z^3 - 998.2002507z^4 + 12.12894824z^5 - 0.061244362z^6. \quad (5)$$

Далее с помощью одного из численных метода поиска экстремума функции одной переменной (в рассматриваемом случае использовался метод золотого сечения) определялось значение координаты z_3 , соответствующей «идеальному» экстремуму C_3 . Затем для заданной частоты вращения ротора ТНА по формуле (4) вычислялось расстояние между двумя соседними импульсами опроса ($l_{осч}$)

и в соответствии с (5) определялись значения $C_{3-АЦП}$ для $z = z_3 \pm \frac{l_{осч}}{2}$.

Тогда с учетом (2) для заданных исходных данных относительная погрешность дискретизации $\left(\delta = \frac{\Delta C}{C_3} \cdot 100\% \right)$ составит 0,57 % для скорости вращения 20 000 об/мин и 0,011 % для скорости вращения 8 000 об/мин соответственно. В случае необходимости указанная погрешность может быть уменьшена за счет дополнительной обработки сигнала $C_{АЦП}(t)$. В [12] предлагается способ снижения погрешности дискретизации за счет дополнительной аппроксимации кодов в зоне $C_{3-АЦП}$ на основе полиномов Чебышева I рода или квадратичной параболы с нахождением экстремума аппроксимированной функции численными или аналитическими методами соответственно. В частности, использование алгоритма, предусматривающего в качестве аппроксимирующей функции квадратичную параболу с последующим аналитическим определением координат её вершины (экстремального значения), позволяет уменьшить рассматриваемую погрешность дискретизации до 0,23 % при вращении ротора ТНА с частотой 20000 об/мин и до 0,003 % для частоты вращения ротора 8000 об/мин.

Еще одной составляющей систематической погрешности является погрешность вычисления осевого перемещения вала ротора ТНА в РУП. Как уже отмечалось, реализация кластерных методов измерения x, y -координат смещений элементов конструкций энергосиловых установок подразумевает совокупные измерения с помощью нескольких ОВТД (по числу искомым координат, в рассматриваемом случае – 2) с последующим нахождением искомым параметров путем решения системы уравнения, полученной на основе экспериментально снятых градуировочных характеристик вида (1).

Для снятия градуировочных характеристик измерительных каналов прототипа системы контроля состояния РУП использовался тот же стенд (см. рис. 1), что и в предыдущих экспериментах. Измерительный диск на валу электродвигателя был заблокирован в ситуации, когда один из зубьев находился в верхнем вертикальном положении. С помощью координатно-подвижной каретки имитатор статора с закрепленными на нем ОВТД устанавливался над измерительным диском в положении, соответствующим минимальному зазору между зубом и чувствительными элементами датчика и нулевому осевому смещению диска. Далее для каждого ОВТД путем последовательного перемещения каретки в радиальном и осевом направлениях устанавливались заданные положения датчика относительно зуба и фиксировался соответствующий цифровой код. Результаты градуировки для каждого ОВТД в виде двумерных таблиц или коэффициентов многопараметровых (в рассматриваемом случае – двухпараметровых) аппроксимирующих полиномов заносятся в память системы. На рабочих режимах функционирования системы по кодам $C_{1,э-АЦП}$ и $C_{2,э-АЦП}$ с помощью специальных алгоритмов [8, 14, 15] вычисляются искомые координаты x (осевые смещения) или y (радиальные зазоры).

Очевидно, что процесс экспериментальной градуировки каналов системы является длительным и трудоемким даже для измерения двухкоординатных перемещений. Поэтому зачастую приходится сокращать объем метрологических экспериментов, что, безусловно, приводит к увеличению соответствующих вычислительных погрешностей.

На рис. 5 в графическом виде представлены градуировочные характеристики измерительных каналов системы контроля состояния РУП для ОВТД₁ ($C_1(x,y)$, рис. 5, а) и ОВТД₂ ($C_2(x,y)$, рис. 5, б), полученные в диапазонах изменения радиальных зазоров от 0,5 до 1,5 мм с шагом 0,5 мм и осевых перемещений измерительного диска от –1,0 до +1,0 мм и шагом 0,2 мм.

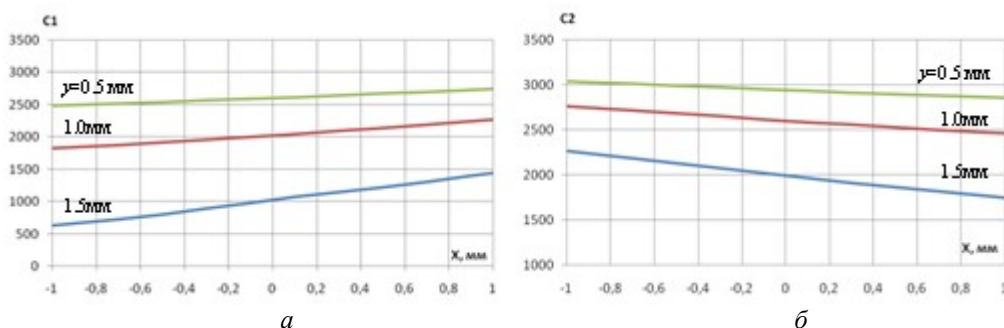


Рис. 5. Экспериментальные семейства ГХ для ОВТД₁ $C_1(x,y)$ (а) и ОВТД₂ $C_2(x,y)$ (б)

Для оценки вычислительной погрешности использовались те же технические средства (стенд на рис. 1) и та же методика, что и при снятии градуировочных характеристик. Однако в отличие от градуировочных экспериментов метрологический эксперимент проводился для промежуточных (не «узловых») значений по радиальному зазору, равных 0,75 и 1,25 мм. Контрольные точки по осевому перемещению оставались теми же, что и при градуировке ([–1.0, –0.8, –0.6, –0.4, –0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0]). Вычислительная погрешность рассчитывалась в соответствии с выражением

$$\delta_{\varepsilon} = \frac{x_p - x_{\varepsilon}}{x_2 - x_1} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где x_p – реальное значение осевого смещения, выставяемое с помощью координатно-подвижной каретки, x_{ε} – вычисленное на основе результатов измерения с помощью соответствующих алгоритмов значение осевого смещения, x_1, x_2 – границы диапазона измерения осевых перемещений вала ($x_1 = -1.0$ мм, $x_2 = +1.0$ мм).

Результаты расчета вычислительной погрешности для двух значений радиальных зазоров при изменяющихся осевых перемещениях вала в РУП ТНА (измерительного диска) представлены в графическом виде на рис. 6.

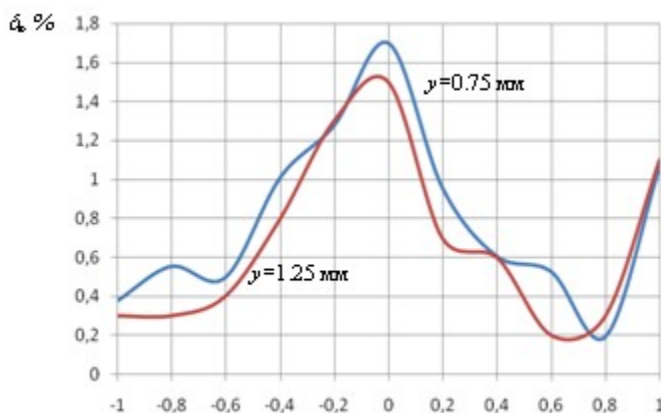


Рис. 6. Приведенная погрешность вычисления осевых смещений вала в РУП

Как видно из представленных данных, погрешность вычисления осевых смещений (x -координаты) для обоих случаев не превышает 1,8 %. При этом максимального значения погрешность достигает в случае, когда зуб на измерительном диске равноудален от чувствительных элементов ОВТД₁ и ОВТД₂ ($x = 0$), постепенно уменьшаясь к краям диапазона (максимальное осевое перемещение вала в том или ином направлении). В большинстве случаев для функций контроля состояния РУП указанной погрешности вполне достаточно, чтобы достоверно определить направление и величину перемещения вала в подшипнике. Однако при необходимости погрешность может быть уменьшена за счет более подробной градуировки измерительных каналов системы или использования для определения осевых перемещений функций преобразования, полученных расчетным путем [9]. В последнем случае необходима разработка адекватных моделей электромагнитного взаимодействия элементов конструкций силовых установок с чувствительными элементами ОВТД [16–18].

Погрешность может быть снижена за счет уменьшения шага по координатам x и y при формировании ГТ из-за особенностей работы алгоритма вычисления координат смещения. Подробная оценка такой погрешности приведена в работе [7].

Заключение

Применительно к задаче контроля состояния РУП ТНА приведены некоторые оценки случайной и систематической составляющих основной погрешности измерения осевых перемещений вала, увеличивающихся по мере разрушения подшипникового узла и характеризующих его износ. Показано, что для фрагмента выборки кодов объемом 150 отсчетов, полученной при опросе измерительного канала с ОВТД, большая часть кодов не выходит за пределы разброса в ± 4 единицы. При этом СКО составило 3,09 единицы, а его относительное значение, приведенное к диапазону изменений выходных кодов, составило 0,23 %. Усреднение рассматриваемой выборки всего по 10 отсчетам привело к уменьшению максимального разброса кодов до $\pm 2,5$ единицы, СКО при этом составило 1,1 единицы, т. е. в относительных единицах приведенная к диапазону изменений выходных кодов случайная погрешность уменьшилась почти втрое и составила 0,08 %.

Оценена погрешность дискретизации сигнала на выходе ИЦ с ОВТД применительно к задаче измерения осевых перемещений вала в РУП с учетом используемых средств аналого-цифрового преобразования и рабочей частоты вращения ротора ТНА. Показано, что указанная составляющая систематической погрешности составляет 0,57 % при скорости вращения ротора ТНА, равной 20 000 об/мин, и 0,011 % для скорости вращения 8 000 об/мин соответственно. При этом применение дополнительной цифровой обработки сигнала в области экстремальных значений кодов, соответствующих прохождению торцом зуба измерительного диска зоны чувствительности ОВТД, позволило уменьшить данную составляющую вдвое (до 0,23 %) при вращении ротора ТНА с частотой 20000 об/мин и почти на порядок (до 0,003 %) – для частоты вращения ротора 8000 об/мин.

На основе экспериментально снятых градуировочных характеристик исследована погрешность вычисления искомых перемещений вала ротора ТНА в осевом направлении в РУП, характеризующих процесс разрушения подшипника при двух значениях зазоров между чувствительным элементом ОВТД и зубом измерительного диска. Показано, что вычислительная погрешность для обоих случаев не превышает 1,8 %, достигая максимальных значений для положения измерительного диска, когда зуб равноудален от чувствительных элементов ОВТД₁ и ОВТД₂ ($x = 0$), постепенно уменьшаясь к краям диапазона (максимальное осевое перемещение вала в том или ином направлении). Отмечено, что для функций контроля состояния РУП указанной погрешности вполне достаточно для достоверного определения направления и величины перемещения вала в подшипнике. Уменьшения указанной составляющей погрешности требует более подробной градуировки измерительных каналов системы или использования функций преобразования измерительных каналов на основе моделей электромагнитного взаимодействия элементов конструкций силовых установок и ОВТД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевченко Г. Ю., Лукишин М. Г. Жидкостные ракетные двигатели: учеб. пособие. Красноярск: СибГУ. 2018. 98 с.
2. Лабораторный стенд для проверки работоспособности системы диагностики радиально-упорного подшипника ТНА НК-33 / В.А. Белослудцев, С.Ю. Боровик, В.П. Данильченко, М.М. Кутейникова, П.Е. Подлинов, Ю.Н. Секисов // Перспективы развития двигателе-

- строения: материалы докладов международной научно-технической конференции 21–23 июня 2023 г.: в 2 томах. Т. 2. Самара: Издательство Самарского университета. 2023. С. 151–153.
3. NASA Independent Review Team Orb-3 Accident Investigation Report. Executive Summary // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf
 4. Тресвятский С.Н., Федорченко Д.Г., Данильченко В.П. Космические двигатели СНТК имени Н.Д. Кузнецова // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2006. № 2–1. С. 16–22.
 5. Antares Launch Vehicle. Antares Overview // <https://web.archive.org/web/20130922012950/http://www.orbital.com/NewsInfo/MissionUpdates/Orb-D1/files/9%20Antares%20Overview.pdf>
 6. Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors / V. Belosludtsev, S. Borovik, V. Danilchenko, Y. Sekisov // Sensors 2021. No. 21. P. 3463.
 7. Патент № 2778031 Российская Федерация, МПК G01B 7/14 (2006.01), G01N 27/9013 (2021.01) Вихретоковый датчик со смещенным чувствительным элементом: № 2021110157: заявл. 12.04.2021: опубл. 12.08.2022 / Белослудцев В.А., Боровик С.Ю., Коршиков И.Г., Секисов Ю.Н.; заявитель СамНЦ РАН. 11 с.
 8. 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.
 9. Borovik S., Kuteynikova M., Sekisov Y. Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors. 2023. V. 23. P. 351.
 10. Структура и алгоритмы функционирования системы контроля осевых перемещений вала в радиально-упорном подшипнике турбонасосного агрегата жидкостного реактивного двигателя НК-33 / В.А. Белослудцев, С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 3. С. 98–110. doi: 10.14498/tech.2022.3.7
 11. Гарманов А.В. Преобразователи напряжения измерительные L-Card E20-10, E20-10-1, E20-10-D, E20-10-D-1, E20-10-D-I, E20-10-D-1-I. Руководство пользователя. М.: ЗАО «Л-Кард», 2021. 79 с.
 12. Погрешности дискретизации в системах измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины / С.Ю. Боровик, М.М. Кутейникова, Ю.Н. Секисов, О.П. Скобелев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2016. № 2 (50). С. 83–90.
 13. Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипов П.Е. Оценка погрешностей дискретизации при определении экстремальных значений кодов в системах измерения радиальных зазоров в компрессорах турбомашин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2018. № 1 (57). С. 47–54.
 14. 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.
 15. Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII междунар. конф. Самара: СамНЦ РАН. 2010. С. 323–327.
 16. Боровик С.Ю., Маринина Ю.В., Секисов Ю.Н. Модель кластерного одновиткового вихретокового датчика на основе метода конечных элементов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2007. № 1. С. 76–83.
 17. 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. Труды XV международной конференции. Самара: Самарский НЦ РАН. 2013. С. 627–635.
 18. Modeling the process of measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips / S.Y. Borovik, M.M. Kuteynikova, P.E. Podlipnov, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev // Optoelectron. Instrument. Proc. 51, 512–522 (2015). <https://doi.org/10.3103/S8756699015050118>

Статья поступила в редакцию 5 марта 2024 г.

THE ERRORS OF THE SHAFT'S AXIAL MOVEMENT MEASURING IN THE SINGLE-COIL-EDDY-CURRENT-SENSORS-BASED SYSTEM FOR THE MONITORING THE STATE OF RADIAL THRUST BEARING OF THE NK-33 LIQUID ROCKET ENGINE'S TURBOPUMP UNIT

S.Y. Borovik¹, V.P. Danilchenko^{1,2}, M.M. Kuteynikova¹, Y.N. Sekisov¹

¹Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute for the Control of Complex Systems RAS (ICCS RAS)
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

²PJSC "UEC-Kuznetsov"
29, Zavodskoe hw., Samara, 443009, Russian Federation

E-mail: borovik@iccs.ru, vdan26@mail.ru, kuteynikova@iccs.ru, sekisov@iccs.ru

Abstract. *This article continues a series of publications devoted to the problems of early state diagnosis of the combined journal-and-thrust bearing of the turbo-pump unit of the liquid-propellant rocket engine NK-33, which is a critical node of the power plant under consideration. The proposed approach is based on the idea of replacing the standard induction sensors of the turbo-pump rotational speed currently used in turbo-pump unit by specially designed single-coil eddy current sensors with sensitive elements in the form of a segment of a linear conductor. The transducers are placed in the same mounting holes as the standard rotor's speed sensors and their sensitive elements are oriented relative to the tooth of the measuring disc on the controlled shaft in such a way that the tip of the tooth remains in the sensitivity zone of both sensors during all possible movements of the shaft. The change in the axial position of the disk caused by the displacement of the rotor shaft in the radial thrust bearing during its destruction is determined on the basis of combined processing of the eddy current sensors' output signals during the passage of the tooth under the sensors' sensitive elements. The implementation of the standard rotor's speed measuring function in the main and backup channels is ensured by fixing the moments of the tooth passage through the geometric centers of the sensitive elements of the first and second sensors in the cluster. The article is devoted to estimation of errors of the shaft's axial movement measuring in the channels of the system for monitoring the state of radial thrust bearing of the NK-33 liquid rocket engine's turbopump unit. In particular, the random and systematic components of the basic error caused by the interference, the finite sampling frequency and the chosen method for calculating the desired shaft movements are given.*

Keywords: *liquid-propellant jet engine, turbo-pump unit, thrust bearing, wear diagnostics, single-coil eddy current sensor, axial movements' monitoring, cluster methods, measuring errors*

REFERENCES

1. Shevchenko G.Y., Lukishin M.G. Zhidkostnye raketnye dvigateli: ucheb. posobie [Liquid-propellant rocket engines: Teaching Manual]. Krasnoyarsk: SibGU. 2018. 98 p. (in Russian).
2. Laboratornyj stand dlya proverki rabotosposobnosti sistemy diagnostiki radial'no-upornogo podshipnika TNA NK-33 [Laboratory bench for testing the performance of the system for TNA NK-33 radial thrust bearing diagnostic] / V.A. Belosludtsev, S.Y. Borovik,

Sergey Yu. Borovik, (Dr. Tech. Sci.), Leading Researcher.
Valeriy P. Danilchenko, (Dr. Tech. Sci.), Leading Project Engineer, Professor.
Marina M. Kuteynikova, (PhD. Sci. (Techn.)), Senior Researcher.
Yuriy N. Sekisov, (Dr. Tech. Sci.), Chief Researcher, Associate Professor.

- V.P. Danilchenko, M.M. Kuteynikova, P.E. Podlypnov, Y.N. Sekisov* // Prospects of development of the engines: Proceedings of the International Conference, June 21–23, 2023: in 2 vol. Vol. 2. Samara: Izdatelstvo Samarskogo Universiteta. 2023. 151–153. (In Russian).
3. NASA Independent Review Team Orb–3 Accident Investigation Report. Executive Summary // https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/orb3_irt_execsumm_0.pdf
4. *Tresvyatskiy S.N., Fedorchenko D.G., Danilchenko V.P.* Kosmicheskie dvigateli SNTK imeni N.D. Kuznetsova [Space engines of SNTK named after N.D. Kuznetsov] // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2006. 10. 2–1. Pp. 16–22. (In Russian).
5. Antares Launch Vehicle. Antares Overview // <https://web.archive.org/web/20130922012950/http://www.orbital.com/NewsInfo/MissionUpdates/Orb-D1/files/9%20Antares%20Overview.pdf>
6. Wear Diagnostics of the Thrust Bearing of NK-33 Turbo-Pump Unit on the Basis of Single-Coil Eddy Current Sensors / *V. Belosludtsev, S. Borovik, V. Danilchenko, Y. Sekisov* // Sensors 2021. No. 21. P. 3463.
7. Patent № 2778031 Rossijskaya Federaciya, MPK G01B 7/14 (2006.01), G01N 27/9013 (2021.01) Vihretokovyy datchik so smeshchennym chuvstvitel'nyim elementom: № 2021110157: zayavl. 12.04.2021: opubl. 12.08.2022 [Patent RF No. 2778031 Single-coil eddy current sensor with shifted sensitive element] / *Belosludtsev V.A., Borovik S.Y., Korshikov I.G., Sekisov Y.N.*, 2022. (In Russian).
8. Klasternye metody i sredstva izmereniya deformacij statora i koordinat smeshchenij torcov lopatok i lopastey v gazoturbinnnyh dvigatelyah [Cluster methods and tools for measuring stator deformations and displacement coordinates of blade tips and blades in gas turbine engines] / Ed. Skobelev O.P. M.: Mashinostroenie, 2011. 298 p. (In Russian).
9. *Borovik S., Kuteynikova M., Sekisov Y.* Reducing the Impact of Influence Factors on the Measurement Results from Single-Coil Eddy Current Sensors // Sensors. 2023. V. 23. P. 351.
10. Struktura i algoritmy funkcionirovaniya sistemy kontrolya osevyh peremeshchenij vala v radial'no-upornom podshipnike turbonasosnogo agregata zhidkostnogo reaktivnogo dvigatelya NK-33 [Structure and operating algorithms of the system for monitoring of the shaft's axial displacement in combined journal-and-thrust bearing of the turbo-pump unit of liquid-propellant rocket engine NK-33] / *V.A. Belosludtsev, S.Y. Borovik, M.M. Kuteynikova, Y.N. Sekisov* // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2022. Vol. 30. No. 3. Pp. 98–110. (In Russian).
11. *Garmanov A.V.* Preobrazovateli napryazheniya izmeritel'nye L-CardE20-10, E20-10-1, E20-10-D, E20-10-D-1, E20-10-D-I, E20-10-D-1-I. Rukovodstvo pol'zovatelya [Voltage measuring converters L-CardE20-10, E20-10-1, E20-10-D, E20-10-D-1, E20-10-D-I, E20-10-D-1-I] User's Guideline. M.: ZAO L-Kard, 2021. 79 p. (In Russian).
12. Pogreshnosti diskretizatsii v sistemah izmereniya radial'nyh i osevyh smeshchenij torcov lopatok rabocheho kola turbiny [Discretization errors in the systems for measuring of turbine blades tips' radial and axial displacements] / *S.Y. Borovik, M.M. Kuteynikova, Y.N. Sekisov, O.P. Skobelev* // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2016. No. 2(50). Pp. 83–90. (In Russian).
13. *Belopukhov V.N., Borovik S.Y., Podlipnov P.E.* Ocenka pogreshnostej diskretizatsii pri opredelenii ekstremal'nyh znachenij kodov v sistemah izmereniya radial'nyh zazorov v kompressorah turbomashin [Sampling errors estimation in the determination of codes of extreme values in systems for measurements of radial clearances in compressors of turbomachines] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2018. No. 1(57). Pp. 47–54. (in Russian).
14. Metody i sredstva izmereniya mnogomernykh peremeshchenij elementov konstrukcij si-lovykh ustanovok [Methods and Tools for Measuring Multidimensional Displacements of Structural Components of Power Plants] / Eds. Sekisov Y.N., Skobelev O.P. Samara: Izd. SamNTs RAN, 2001, 188 p. (In Russian).
15. *Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N.* Algoritm vychisleniya radial'nyh i osevyh smeshchenij torcov lopatok [Blade Tips Radial Clearances and Axial Displacements Calculation Algorithm] // Proceedings of the XII International Conference “Complex Systems: Control and Modelling Problems”, Samara, Russia, 2010. Pp. 323–327. (In Russian).
16. *Borovik S.Yu., Marinina Yu.V., Sekisov Yu.N.* Model' klasternogo odnovitkovogo vihetkovogo datchika na osnove metoda konechnykh elementov [Model of a cluster single-coil eddy current sensor based on the finite element method] // Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhn. Nauki. 2007. No. 19(1). Pp. 76–83. (In Russian).

17. Kuteynikova M.M., Sekisov Y.N., Skobelev O.P. Model' elektromagnitnogo vzaimodejstviya chuvstvitelnogo elementa odnovitkovogo viretovkovogo datchika s torcom lopatki slozhnoj formy [Model of electro-magnetic interaction between sensitive element of single-coil eddy current sensor and a tip of complex-shaped blade] // Proceedings of the XV International Conference "Complex Systems: Control and Modelling Problems", Samara, Russia, 2013. Pp. 627–635. (In Russian).
18. Modeling the process of measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips / S.Y. Borovik, M.M. Kuteynikova, P.E. Podlipnov, Yu.N. Sekisov, O.P. Skobelev // *Optoelectron. Instrument. Proc.* 51, 512–522 (2015).
<https://doi.org/10.3103/S8756699015050118>