

УДК 681.518

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА МАСЛА НА РЕЗУЛЬТАТ ОБНАРУЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ИЗНОСА ПАР ТРЕНИЯ В СИСТЕМАХ СМАЗКИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

© С. Ю. Боровик, О. А. Заякин, П. Е. Подлипов, Ю. Н. Секисов

*Самарский федеральный исследовательский центр РАН,  
Институт проблем управления сложными системами РАН,  
443020, г. Самара, ул. Садовая, 61  
E-mail: borovik@iccs.ru*

Рассматривается задача контроля наличия металлических частиц износа пар трения в маслосистемах энергосиловых установок. Решение задачи предлагается на основе применения многоканального кластерного вихретокового датчика с одновитковыми чувствительными элементами. Датчик устанавливается в разрыв масляной магистрали силовой установки и обеспечивает идентификацию ферромагнитных и неферромагнитных частиц металла, а также ранжирование их по нескольким размерным группам. Рассматриваются особенности преобразования индуктивностей чувствительных элементов в дифференциальных измерительных цепях при движении частиц металла по масляному каналу датчика, и анализируется влияние скорости движения частиц в потоке масла на результат преобразования сигналов датчика. Приводится алгоритм распознавания частиц металла и отнесения их к заданным размерным группам. Оценивается корректность работы алгоритма с учётом возможного влияния скорости движения частиц по масляному каналу датчика.

*Ключевые слова:* силовая установка, пара трения, частица износа, кластерный одновитковый вихретоковый датчик, скорость движения, алгоритмы обнаружения и ранжирования частиц.

DOI: 10.15372/AUT20220404

**Введение.** Известно, что одним из надёжных и достоверных способов оценки состояния движущихся частей и механизмов энергетических машин различного класса является анализ наличия частиц износа соприкасающихся элементов в системах смазки силовых установок [1–6]. По мере выработки или разрушения соответствующих пар трения размеры таких частиц и их концентрация в масле лавинообразно возрастают [7]. При этом непрерывный контроль состояния смазываемых узлов обеспечивает своевременное обнаружение зарождающихся в них дефектов и переход от планового технического обслуживания силовых установок к их обслуживанию по фактическому состоянию, что является эффективным не только с экономической точки зрения, но и позволяет существенно повысить безопасность эксплуатации изделий и объектов, на которых они установлены, путём оперативного принятия мер по предупреждению развития аварийных ситуаций [8].

Среди известных и широко применяемых в настоящее время методов онлайн мониторинга частиц износа пар трения наиболее перспективными с практической точки зрения считаются индуктивные методы, которые нечувствительны к масляно-воздушной среде в зоне измерения и позволяют не только обнаружить металлические частицы в потоке масла, но и оценить их размер и магнитные свойства [9–11]. Последнее свойство является важным с точки зрения локализации места развития дефекта в контролируемом узле.

В работах [10, 12, 13] рассматривается подход к построению систем непрерывного контроля частиц износа в маслосистемах авиакосмических и транспортных машин, обеспечивающий детектирование ферромагнитных и неферромагнитных частиц металла в масле и

распределение их по нескольким размерным группам. В основе подхода лежит одновитковый вихретоковый кластерный датчик металлической стружки (ОВКДС), устанавливаемый в разрыв маслопровода контролируемого изделия [14]. Данный датчик принадлежит к многоканальным устройствам с параллельной обработкой сигналов и позволяет преодолеть «узкое место» индуктивных методов, связанное с низкой чувствительностью к детектируемым частицам, что существенно ограничивает применение традиционных средств контроля в маслопроводах большого диаметра ( $>20$  мм) [10, 12], наиболее типичных для энергосиловых установок высокой мощности. К последним, прежде всего, относятся газотурбинные двигатели (ГТД) авиационного, наземного и морского применения, где системы подобного рода максимально востребованы.

Применительно к рассматриваемому классу энергосиловых установок следует отметить, что эксплуатационные режимы работы ГТД меняются в достаточно широких пределах — от малого газа до взлётного, что, в свою очередь, определяет происходящие в двигателе процессы, а также тепловую и динамическую напряжённость его деталей. Необходимо учитывать, что масло является рабочей жидкостью, используемой не только для смазки трущихся элементов, но и для отвода тепла от них. При этом в современных ГТД обеспечение приемлемого теплового состояния пар трения зачастую является существенно более важной функцией масляных систем по сравнению с обеспечением смазки трущихся поверхностей [15]. В частности, в [1] отмечается, что величина теплоотдачи в масло — один из важных параметров маслосистемы ГТД, определяющий скорость прокачки масла через узлы двигателя, а следовательно, и через ОВКДС.

Учитывая, что масса детектируемых частиц износа мала, можно допустить, что скорость их перемещения через масляный канал датчика примерно равна скорости потока масла в маслопроводе системы смазки, в разрыв которого установлен ОВКДС. Это означает, что при постоянной частоте аналого-цифрового преобразования сигналов ОВКДС изменение режима работы силовой установки и, как следствие, скорости прокачки масла через масляный канал датчика приведёт к появлению динамической погрешности определения амплитуды напряжения на выходе измерительной цепи, формируемого при прохождении частицы металла через чувствительный элемент (ЧЭ) ОВКДС, что, в свою очередь, может стать причиной некорректного отнесения обнаруженных частиц к заданным размерным группам.

Представленная работа посвящена анализу влияния скорости движения частиц металла в потоке масла на результат преобразования сигналов ОВКДС, а также оценке корректности работы алгоритмов обнаружения частиц износа и отнесения их к заданной размерной группе в условиях такого влияния.

**1. Особенности преобразования сигналов ОВКДС.** Ключевые положения подхода к обнаружению металлических частиц в потоке масла работающей силовой установки на основе применения ОВКДС нашли отражение в работах [10, 13, 14]. Основная идея заключается в разделении общего потока масла, поступающего в датчик, на несколько независимых потоков с меньшей площадью сечения, однако достаточной, чтобы не задерживать частицы металла. При этом суммарная площадь «частных» потоков выбирается равной площади сечения входного потока масла. Такое решение позволяет существенно повысить чувствительность датчика к частицам металла при незначительном увеличении гидравлических потерь в маслопроводе.

Каждый частный поток в ОВКДС охватывается двумя идентичными ЧЭ, смещёнными относительно друг друга на фиксированное расстояние. Преобразование изменений индуктивностей ЧЭ осуществляется в модифицированных дифференциальных измерительных цепях (ИЦ) на основе трансформаторного моста Блюмлейна [16]. Сигнал на выходе

такой ИЦ с включёнными в неё ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> может быть описан выражением [10]

$$U_{\text{ИЦ}} = E \frac{L_{\text{Э}2} - L_{\text{Э}1}}{L_{\text{Э}1} + L_{\text{Э}2}}, \quad (1)$$

где  $E$  — напряжение источника питания ИЦ, а  $L_{\text{Э}1}$  и  $L_{\text{Э}2}$  — эквивалентные индуктивности ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub>, пересчитанные к первичным обмоткам согласующих трансформаторов (СТ), которые обеспечивают подключение ЧЭ к ИЦ. Учитывая близкое расположение ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> и идентичность их параметров (равно как и параметров СТ<sub>1</sub> и СТ<sub>2</sub>), изменения температуры масла в масляном канале датчика, связанные с изменением режима работы силовой установки, будут воздействовать на оба ЧЭ в равной степени, а потому будут одинаковыми и изменения эквивалентных индуктивностей  $L_{\text{Э}1}$  и  $L_{\text{Э}2}$ , вызванные этим воздействием. Тогда при отсутствии частицы металла в масляном канале датчика сигнал на выходе ИЦ будет иметь нулевой уровень ( $U_{\text{ИЦ}} = 0$ ) и не будет зависеть от изменений температуры масла в зоне измерения.

Движение частицы металла по масляному каналу датчика приводит к формированию на выходе ИЦ двух последовательных разнополярных импульсов напряжения, амплитуда которых определяется размером частицы и её местоположением в плоскости контура ЧЭ, а полярность — магнитными свойствами металла частицы. В частности, как показано в [10, 16], неферромагнитная частица металла при прохождении контуров ЧЭ уменьшает их эквивалентные индуктивности, что в соответствии с (1) приводит к формированию на выходе ИЦ импульса напряжения положительной полярности при прохождении частицы через контур ЧЭ<sub>1</sub> и импульса напряжения отрицательной полярности при прохождении той же частицы металла через контур ЧЭ<sub>2</sub>. В свою очередь, ферромагнитная частица металла при прохождении через контуры ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> увеличивает их эквивалентные индуктивности, а это означает, что полярность импульсов напряжения на выходе ИЦ при прохождении частицы через контуры ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> будет последовательно меняться с отрицательной на положительную.

Следует отметить, что использование дифференциальной ИЦ с двумя идентичными ЧЭ, установленными в одном масляном канале ОВКДС, помимо компенсации температурных воздействий на датчик, позволяет повысить достоверность обнаружения частиц металла за счёт дополнительного диагностического признака, который связан с обязательным наличием на выходе ИЦ последовательности из двух импульсов противоположной полярности при прохождении частиц через контуры ЧЭ. Кроме того, в [17] также рассматривается возможность использования такого датчика для косвенной оценки скорости масляного потока в трубопроводе по моментам прохождения частиц через контуры ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> соответственно.

**2. Алгоритм распознавания частиц металла и отнесения их к размерным группам.** Напряжения на выходе ИЦ после предварительного усиления подвергаются аналого-цифровому преобразованию с последующей цифровой обработкой кодов, целью которой является выделение информативной составляющей сигнала и определение размеров и магнитных свойств обнаруженных частиц. Для систем непрерывного контроля частиц износа пар трения на основе ОВКДС информативными параметрами являются амплитудное значение и полярность импульса напряжения на выходе ИЦ при прохождении частицы металла через плоскость контура первого по направлению потока масла ЧЭ (обычно ЧЭ<sub>1</sub>). Как уже отмечалось, полярность сигнала характеризует магнитные свойства материала частицы, а величина амплитуды сигнала — её размер. При этом с практической точки зрения для выявления особенностей развивающегося в узле трения дефекта важным является не столько точно определить размер обнаруженной частицы, сколько оценить его, отнеся частицу к определённой размерной группе.

В [18] предложен один из таких способов обнаружения ферромагнитных и неферромагнитных частиц металла в системе смазки узлов трения силовых установок с разбиением частиц на группы по размерам. Способ основан на «вероятностном» подходе с использованием предварительно снятых в лабораторных условиях семейств градуировочных характеристик измерительных каналов с ОВКДС в виде аппроксимированных зависимостей напряжений на выходах ИЦ (чаще — цифровых кодов) от положения «эталонных» частиц металла с заданными магнитными свойствами и размерами в плоскости ЧЭ.

В рабочем режиме функционирования силовой установки при прохождении частицы металла через плоскость контура ЧЭ<sub>1</sub> фиксируется цифровой код АЦП ( $C_{ч.м}$ ), соответствующий амплитуде импульсного сигнала, сформированного на выходе ИЦ. Величина  $C_{ч.м}$  зависит от размера детектируемой частицы и от её положения в плоскости ЧЭ, причём такая зависимость имеет сугубо нелинейный характер. Формально можно записать

$$C_{ч.м} = f(d_{ч.м}, r), \quad (2)$$

где  $d_{ч.м}$  — размер (эквивалентный диаметр) частицы;  $C_{ч.м}$  — цифровой код, соответствующий амплитуде сигнала при прохождении частицы через зону чувствительности ЧЭ;  $r$  — радиальное положение частицы в плоскости контура ЧЭ. В общем случае  $r$  неизвестно и может принимать любое значение в диапазоне  $0-r_{\max}$ , где  $r_{\max}$  — радиус контура ЧЭ (в существующих конструкциях ОВКДС  $r_{\max} = 3,6$  мм). Вероятность появления частицы металла в диапазоне расстояний  $r_1-r_2$  от центра контура ЧЭ может быть рассчитана в соответствии с выражением

$$P = \int_{r_1}^{r_2} p(x) dx, \quad (3)$$

где  $p(x)$  — функция плотности вероятности.

В предположении непрерывного равномерного закона распределения вероятности появления частицы металла в плоскости контура ЧЭ радиусом  $r_{\max} = 3,6$  мм выражение (3) примет следующий вид [19]:

$$P = 0,278(r_2 - r_1). \quad (4)$$

В итоге последовательность действий, составляющих алгоритм распознавания частиц металла и отнесения их к размерным группам, сводится к следующим операциям:

1. В исходном массиве кодов с результатами опроса канала ОВКДС выделяется фрагмент, соответствующий прохождению частицы металла через зону чувствительности ЧЭ<sub>1</sub>.

2. В выделенном фрагменте находится глобальный экстремум кода ( $C_{extr}$ ) и определяется его знак.

3. Если экстремум  $C_{extr} > 0$ , то частица признаётся неферромагнитной и, наоборот, если  $C_{extr} < 0$ , то делается вывод, что частица ферромагнитная.

4. Для семейства градуировочных характеристик и кода  $C_{extr}$  определяют возможные значения  $d_{ч.м}$ :

- 4.1. Находят точки пересечения «линии» кода  $C = C_{extr}$  с семейством градуировочных характеристик (2).

- 4.2. Если «линия» кода  $C = C_{extr}$  не пересекает ни одну градуировочную характеристику, то в зависимости от величины  $C_{extr}$  частицу относят либо к группе  $d_{ч.м} < d_{ч.м, \min}$ , либо к группе  $d_{ч.м} > d_{ч.м, \max}$ .

4.3. Если «линия» кода  $C = C_{extr}$  пересекает только одну градуировочную характеристику  $C_{ч.м.,i} = f(d_{ч.м.,i} r_i)$ , то частицу относят к размерной группе  $d_{ч.м.,i}$ .

4.4. Если «линия» кода  $C = C_{extr}$  пересекает несколько градуировочных характеристик  $C_{ч.м.,i} = f(d_{ч.м.,i} r_i)$ ,  $C_{ч.м.,j} = f(d_{ч.м.,j} r_j)$ , ..., то сначала определяют точки  $r_i, r_j, \dots$ , а затем на основании (4) вычисляют вероятности  $P_i, P_j, \dots$  прохождения частицы металла через плоскость контура ЧЭ через зоны, ограниченные участками  $[0, r_i), [r_i, r_j), \dots$ . Частицу относят к размерной группе  $d_{ч.м.}$ , для которой  $P$  максимальна, при равенстве  $P_i, P_j, \dots$  — к наибольшей размерной группе.

При этом следует отметить, что последовательность операций по отнесению обнаруженной частицы к той либо иной размерной группе не меняет амплитудного значения кодов, носит характер логических операций и не влияет на метрологические характеристики аналого-цифрового тракта системы контроля.

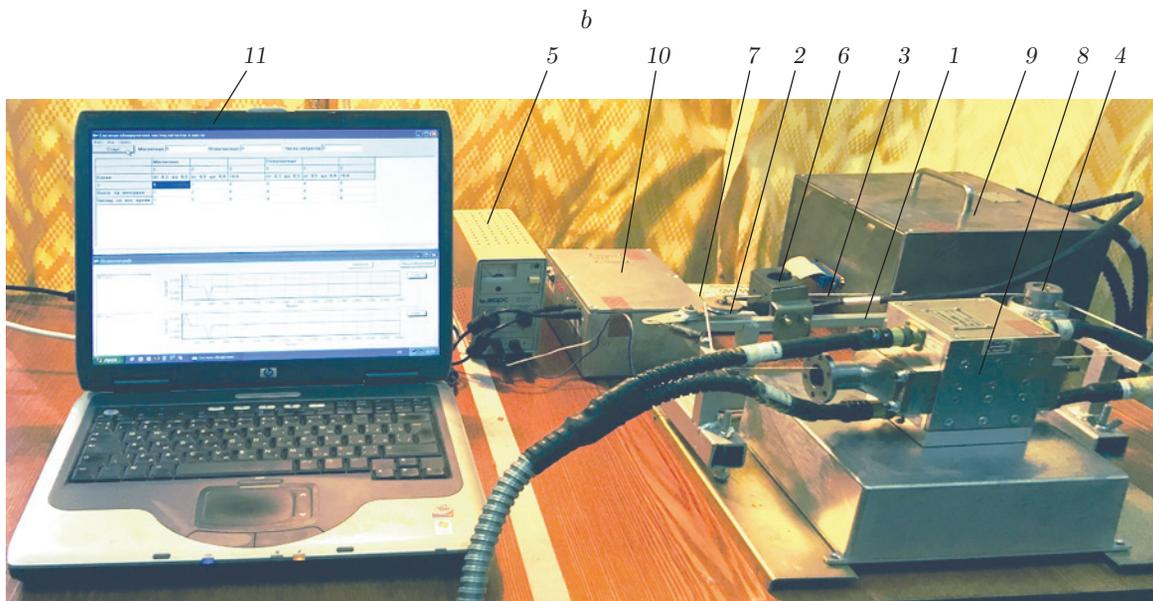
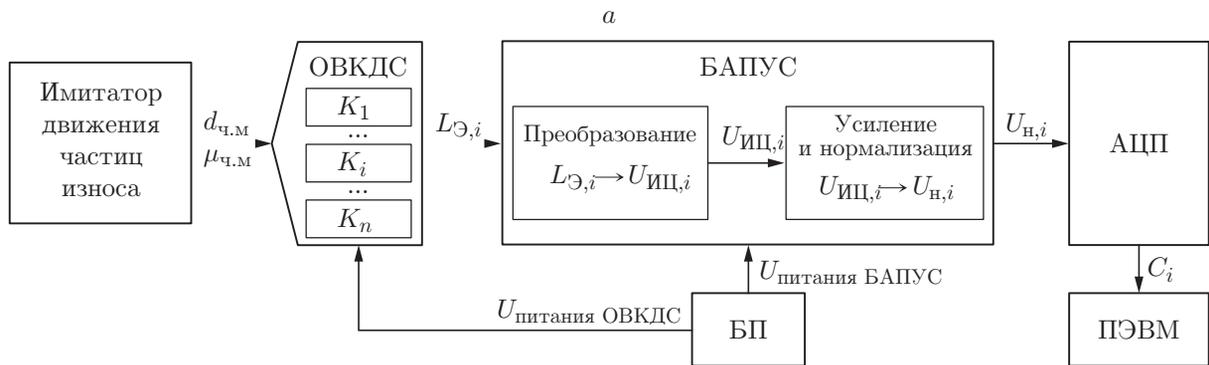
**3. Экспериментальная оценка динамической погрешности определения амплитуды сигнала на выходе измерительной цепи с одновитковым ЧЭ.** На рисунке представлены структурно-функциональная схема (рисунок *a*) и внешний вид (рисунок *b*) лабораторной установки, которая использовалась для экспериментальной оценки динамической погрешности определения амплитуды сигнала на выходе измерительной цепи при имитации движения частиц металла по масляному каналу ОВКДС. Стенд содержит блок имитации движения частиц износа через масляный канал датчика, а также набор стандартных и нестандартных технических средств, обеспечивающих опрос каналов ОВКДС, преобразование изменений индуктивностей его ЧЭ в напряжение и далее в цифровые коды, обработку цифровых сигналов с целью обнаружения и идентификации параметров выявленных частиц.

Блок имитации представляет собой станину 1 с системой направляющих роликов 2, на которые натянуты неэлектропроводные нити (лески) с вклеенными в них тарированными металлическими частицами заданных размеров ( $d_{ч.м.} \in [0,3; 0,5; 0,8]$  мм) и магнитных свойств ( $\mu_{ч.м.} \in [Cu, Fe]$ ) 3. Нити пропускаются через один из масляных каналов ОВКДС, в который вставлена трубка из неэлектропроводного материала, обеспечивающая перемещение частиц по единственной траектории, проходящей через центры ЧЭ<sub>1</sub> и ЧЭ<sub>2</sub> выбранного масляного канала ( $r = 0$ ).

Циклическое перемещение нити через масляный канал ОВКДС обеспечивает малогабаритный двигатель постоянного тока 4, частота вращения ротора которого регулируется с помощью источника постоянного тока с изменяемым выходным напряжением 5, что позволяет имитировать движение частиц на различных режимах работы силовой установки. Для контроля скорости перемещения нити используется оптический датчик 6 на основе нестандартной оптронной пары [20], сигнал с которого после усиления и нормализации заводится на один из свободных аналоговых входов АЦП 7 (внешний модуль Е14-440 производства ЗАО «Л-Кард», Россия [21]), который применяется для преобразования сигналов ОВКДС.

Нестандартные технические средства установки содержат собственно ОВКДС 8, блок аналогового преобразования и усиления сигналов датчика (БАПУС) 9 и блок питания (БП) 10, обеспечивающий подачу питающих напряжений на ОВКДС и БАПУС. Для преобразования аналоговых сигналов с выхода БАПУС в цифровой код используется модуль АЦП 7. Управление сбором, преобразованиями и обработкой информации, поступающей с ОВКДС, осуществляется во внешней персональной электронной вычислительной машине 11 с предустановленным прикладным программным обеспечением (ПО).

Следует отметить, что для усиления и нормализации выходных сигналов измерительных цепей с ЧЭ в БАПУС используются широкополосные операционные усилители AD8052 [22] с частотой среза  $f_{ср} = 110$  МГц. В указанных условиях можно принять, что



Экспериментальная установка для оценки динамической погрешности определения амплитуды сигнала на выходе ИЦ с одновитковым чувствительным элементом: структурно-функциональная схема (*a*) и внешний вид (*b*) (1 — станина, 2 — направляющий ролик, 3 — нить с вклеенными тарированными металлическими частицами, 4 — двигатель постоянного тока, 5 — источник постоянного тока с регулируемым выходным напряжением, 6 — оптический датчик скорости движения нити, 7 — внешний модуль АЦП Е14-440, 8 — ОВКДС, 9 — БАПУС, 10 — БП, 11 — ПЭВМ)

тракт усиления и нормализации не искажает сигнал  $U_{ИЦ,i}(t)$  (см. рисунок *a*) при изменении его длительности, связанной с изменением скорости движения частицы по масляному каналу ОВКДС. Тогда основной составляющей динамической погрешности определения амплитуды сигнала на выходе измерительной цепи будет погрешность дискретизации, которая при постоянной частоте аналого-цифрового преобразования возрастает с уменьшением длительности импульса  $U_{н,i}(t)$ , обусловленного увеличением скорости движения частицы по масляному каналу ОВКДС. Наихудшим случаем следует считать ситуацию, когда преобразование аналогового напряжения  $U_{н,i}(t)$  в цифровой код  $C_i(t)$  происходит в моменты времени, равноотстоящие от экстремума  $U_{н,i}(t)$  при максимальной скорости движения частицы.

Для оценки указанной составляющей погрешности был проведён эксперимент, в котором через один масляный канал ОВКДС последовательно пропускались нити с вклеенными в них медными и стальными частицами в виде равносторонних цилиндров с эквивалентными размерами 0,3; 0,5; 0,8 мм. Скорость движения нитей устанавливалась равной 2,65 м/с, что соответствует максимальному расходу масла 45 кг/мин через маслопровод диаметром 20 мм. Внешний 14-разрядный модуль АЦП Е14-440 функционировал в асинхронном режиме с дифференциальным подключением каналов и диапазоном входных напряжений  $\pm 2,5$  В. Частота преобразования АЦП ( $f_{АЦП}$ ) выбиралась равной 10, 20 и 40 кГц ( $T_{АЦП} = 100, 50$  и  $25$  мкс соответственно) из расчёта получения не менее одного отсчёта кода при прохождении минимальной частицы 0,3 мм через плоскость ЧЭ на максимальной скорости 2,65 м/с. Для уменьшения случайной составляющей погрешности, вызванной влиянием внутренних шумов радиоэлектронных компонентов, использовался программный фильтр скользящего среднего по 10 отсчётам.

Экспериментально полученная огибающая сигнала, соответствующего перемещению частицы в зоне чувствительности ЧЭ<sub>1</sub> выбранного масляного канала ОВКДС, аппроксимировалась ортогональными полиномами Чебышева I рода. Численным методом определялся экстремум  $C_{extr}$  аппроксимированной функции, который и принимался за истинное значение амплитуды полезного сигнала<sup>1</sup>. С помощью того же полинома рассчитывались значения цифровых кодов  $C_{АЦП}$  для наихудшего случая, когда соседние отсчёты равноудалены от экстремального значения  $C_{extr}$  на величину, равную  $T_{АЦП}/2$  при различных частотах преобразования АЦП. Относительная погрешность определения амплитуды сигнала на выходе измерительной цепи с одновитковым ЧЭ вычислялась в соответствии с выражением

$$\delta = \left| \frac{\Delta}{C_{extr}} \right| \cdot 100 \%,$$

где  $\Delta = C_{extr} - C_{АЦП}$ . Результаты эксперимента для медных (неферромагнитных) и стальных (ферромагнитных) частиц приведены в табл. 1, 2 соответственно.

Как видно из представленных в табл. 1 данных, в наибольшей степени частота преобразования АЦП влияет на результат определения амплитуды сигнала на выходе измерительной цепи при прохождении контура ЧЭ стальной частицей минимального размера 0,3 мм (2,06 % при  $f_{АЦП} = 10$  кГц). Это можно объяснить, с одной стороны, большей чувствительностью и соответственно большей крутизной фронтов полезного сигнала при

<sup>1</sup>Аналогичный способ восстановления сигналов и определения экстремальных значений кодов, являющихся информативными параметрами в задачах измерения многокоординатных перемещений элементов конструкций силовых установок, описан в работе [23]. Там же отмечена эффективность способа и показано, что максимально возможная погрешность определения информативного параметра (экстремального значения цифрового кода) по восстановленной огибающей сигнала одновиткового вихретокового датчика на несколько порядков меньше погрешности дискретизации.

Таблица 1

**Погрешности определения амплитуды сигнала на выходе измерительной цепи с одновитковым ЧЭ для медных (неферромагнитных) частиц**

$f_{\text{АЦП}}$ , кГц	Эквивалентный размер частицы, мм					
	0,3		0,5		0,8	
	$ \Delta $ , ед.	$\delta$ , %	$ \Delta $ , ед.	$\delta$ , %	$ \Delta $ , ед.	$\delta$ , %
10	0,16	0,05	2,25	0,27	4,22	0,27
20	0,04	0,01	0,56	0,07	1,05	0,07
40	0,01	0,003	0,14	0,02	0,26	0,02

Таблица 2

**Погрешности определения амплитуды сигнала на выходе измерительной цепи с одновитковым ЧЭ для стальных (ферромагнитных) частиц**

$f_{\text{АЦП}}$ , кГц	Эквивалентный размер частицы, мм					
	0,3		0,5		0,8	
	$ \Delta $ , ед.	$\delta$ , %	$ \Delta $ , ед.	$\delta$ , %	$ \Delta $ , ед.	$\delta$ , %
10	0,93	2,06	5,05	0,49	16,24	0,41
20	0,23	0,51	1,27	0,12	4,04	0,10
40	0,05	0,13	0,32	0,03	1,00	0,03

прохождении ферромагнитных частиц (Fe-частицами) через масляный канал датчика в сравнении с неферромагнитными частицами (Cu-частицами), а с другой — малой площадью взаимодействия ЧЭ с объектом контроля и, как следствие, острым пиком выходного сигнала измерительной цепи. При этом низкая чувствительность датчика к неферромагнитным частицам малых размеров, очевидно, является причиной малой величины относительной динамической погрешности при прохождении такой частицы через зону чувствительности элемента, так как полезный сигнал при этом имеет достаточно плоскую вершину, что обеспечивает получение нескольких отсчётов АЦП при прохождении частицы через масляный канал датчика.

С увеличением размера частицы (как ферромагнитной, так и неферромагнитной) амплитуда сигнала увеличивается, равно как увеличивается и площадь взаимодействия с частицей контура ЧЭ. В итоге составляющая динамической погрешности, связанная с дискретизацией, для частиц с эквивалентным размером от 0,5 мм и более практически не зависит от размера частицы.

Очевидно, что повышение частоты преобразования АЦП позволяет уменьшить динамическую составляющую погрешности определения амплитуды выходного сигнала измерительной цепи, максимальная величина которой при частоте  $f_{\text{АЦП}} = 40$  кГц в абсолютном выражении не превышает 1 единицу кода, что меньше естественного шума АЦП ( $\pm 1$  единица кода). При этом следует отметить, что с практической точки зрения сокращения требуемых аппаратных ресурсов при реализации автономных систем непрерывного контроля частиц износа вполне достаточным является использование АЦП с частотой преобразования 20 кГц, которые обеспечивают «оцифровку» огибающей сигнала с максимальной абсолютной погрешностью дискретизации не более 4 единиц кода для наихудшего случая.

**4. Экспериментальные исследования корректности работы алгоритмов обнаружения частиц износа и отнесения их к заданной размерной группе.** Ранее отмечалось, что в общем случае погрешность определения информационной составляющей

Таблица 3

**Результаты эксперимента по оценке работы алгоритма обнаружения частиц износа и отнесения (корректных/некорректных) к заданным размерным группам**

Скорость движения частиц, м/с	Группы эквивалентных размеров, мм					
	Медные (неферромагнитные) частицы			Стальные (ферромагнитные) частицы		
	[0, 3; 0,5]	(0,5; 0,8]	$\geq 0,8$	[0, 3; 0,5]	(0,5; 0,8]	$\geq 0,8$
1,0	768 / 1	998 / 0	1033 / 0	1001 / 0	925 / 0	1009 / 8
1,5	898 / 1	1028 / 0	1007 / 0	1000 / 0	1009 / 0	1002 / 0
2,0	971 / 0	1005 / 0	1005 / 0	1000 / 0	993 / 0	1003 / 0
2,5	997 / 0	1003 / 0	1002 / 0	998 / 0	994 / 0	1004 / 0

(амплитуды) выходного сигнала измерительной цепи при прохождении частиц износа через зону чувствительности ЧЭ датчика оказывает влияние на работу алгоритма отнесения частиц к заданным размерным группам особенно в областях, прилегающих к границам групп. При этом наличие рассматриваемой составляющей погрешности будет приводить к тому, что абсолютная величина зафиксированного цифрового кода (с учётом знака для ферромагнитных частиц) будет меньше значения кода, соответствующего экстремуму огибающей сигнала на выходе измерительной цепи. Это означает, что при оценке размеров обнаруженной частицы она может быть отнесена к частицам меньшей (более безопасной) размерной группы. Однако, как это было показано в разд. 3, величина динамической составляющей погрешности определения амплитуды полезного сигнала из-за погрешности дискретизации мала, а потому можно ожидать, что она не будет оказывать существенного влияния на работу алгоритма распознавания частиц износа и отнесения их к заданным размерным группам.

Данный вывод подтверждается и специально проведённым экспериментом на лабораторной установке (см. рисунок). Как и в разд. 3, через масляный канал ОВКДС последовательно пропускались нити с вклеенными в них медными (неферромагнитными) и стальными (ферромагнитными) частицами с эквивалентными размерами 0,3; 0,5; 0,8 мм. Скорость движения каждой нити через масляный канал датчика последовательно устанавливалась равной 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 м/с. Контроль скорости движения нити осуществлялся с помощью регулируемого источника постоянного тока. Путём специально разработанного ПО фиксировались результаты распознавания эталонных частиц, включая определение их магнитных свойств и отнесение к следующим группам размеров: [0,3; 0,5), [0,5; 0,8) и  $\geq 8$  мм. Для каждого типа эталонной частицы проводилось от 768 до 1033 замеров при частоте преобразования АЦП 40 кГц. Объём выборки контролировался оптическим датчиком по числу полных оборотов нити. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Как видно из представленных данных, малочисленные ошибки в отнесении обнаруженных частиц к смежным размерным группам не являются следствием влияния динамической погрешности определения амплитуды сигнала на выходе ИЦ, так как проявляются при низких скоростях движения частиц, когда указанная погрешность минимальна. Причиной отнесения некоторых частиц к ошибочной размерной группе является некорректная работа алгоритма в части обнаружения экстремума медленно меняющихся сигналов, что требует дополнительных исследований и соответствующих доработок алгоритма. Тем не менее можно констатировать, что для рассматриваемых в данной работе условий и конфигурации технических средств изменение скорости движения частицы через масляный канал датчика, обусловленное переменными режимами работы силовой установки, не оказывает существенного влияния на результат преобразования сигналов датчика, а также

работу алгоритма распознавания частиц металла и отнесения их к заданным размерным группам.

**Заключение.** Применительно к задаче контроля состояния пар трения силовых установок, решаемой на основе использования одновитковых вихретоковых кластерных датчиков частиц износа, исследовано влияние скорости движения частиц металла в потоке масла, обусловленное изменениями режима работы силовых установок на результат преобразования сигналов датчика и работу соответствующих алгоритмов обнаружения частиц и отнесения их к заданной размерной группе. Показано, что при частоте аналого-цифрового преобразования сигнала на выходе измерительной цепи с включённым в неё одновитковым чувствительным элементом, равной 40 кГц, максимальная величина составляющей динамической погрешности, связанная с дискретизацией, в абсолютном выражении не превышает 1 единицу кода, что меньше естественного шума АЦП ( $\pm 1$  единица кода). При этом уменьшение частоты преобразования АЦП в 2 раза приводит к увеличению максимальной величины указанной составляющей динамической погрешности до 4 единиц кода. Это позволяет при необходимости ослабить требования к вычислительным и аппаратным ресурсам при разработке автономных систем непрерывного контроля частиц износа. Также по результатам экспериментальной проверки корректности работы алгоритма распознавания частиц износа и отнесения их к заданным размерным группам установлено, что для рассматриваемых в работе условий и конфигурации технических средств изменение скорости движения частицы через масляный канал датчика, обусловленное переменными режимами работы силовой установки, не оказывает существенного влияния на работу алгоритма.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 5: Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2008. 185 с.
2. **Edmonds J., Resner M. S., Shkarlet K.** Detection of precursor wear debris in lubrication systems // Proc. of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA, March 18–25, 2000. Vol. 76. P. 73–77.
3. **Myshkin N. K., Markova L. V.** Methods and Instruments for Condition Monitoring of Lubricants // On-line Condition Monitoring in Industrial Lubrication and Tribology. Applied Condition Monitoring. Vol 8. Springer, Cham. 2018. P. 1–29.
4. **López de Calle K., Ferreira S., Roldán-Paraponiaris C., Ulazia A. A.** Context-Aware Oil Debris-Based Health Indicator for Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring // Energies. 2019. **12**, Iss. 17. 3373.
5. **Грядунов К. И., Козлов А. Н., Немчиков М. Л., Мельникова И. С.** Диагностирование авиационных двигателей по содержанию металлов в масле // Науч. вестн. МГТУ ГА. 2019. **22**, № 3. С. 35–44.
6. **Жукова А. А., Шапорова Е. А., Стойко С. О.** Мониторинг авиационного двигателя на наличие металлических примесей в масле // Вестн. Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2021. **42**, № 1. С. 48–50.
7. **Wang X., Sun H., Wang S., Huang W.** Cross-correlation algorithm-based optimization of aliasing signals for inductive debris sensors // Sensors. 2020. **20**. 5949. DOI: 10.3390/s20205949.
8. **Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Блинов А. В. и др.** Средства диагностики и оценки остаточного ресурса пар трения в процессе эксплуатации газотурбинных двигателей // Автометрия. 2021. **57**, № 6. С. 132–140. DOI: 10.15372/AUT20210614.

9. **Cassidy K.** Qualification of an on-line bearing and gear health monitoring technique for in-service monitoring of aircraft engines and helicopter transmissions. URL: [http://www.gastopsusa.com/knowledge\\_center\\_documents/1/MetalSCAN.ISHM07.pdf](http://www.gastopsusa.com/knowledge_center_documents/1/MetalSCAN.ISHM07.pdf) (дата обращения: 25.05.2022).
10. **Borovik S., Sekisov Y.** Single-coil eddy current sensors and their application for monitoring the dangerous states of gas-turbine engines // *Sensors*. 2020. **20**. 2107.
11. **Wu X., Zhang Y., Li N. et al.** A new inductive debris sensor based on dual-excitation coils and dual-sensing coils for online debris monitoring // *Sensors*. 2021. **21**. 7556. DOI: 10.3390/s21227556.
12. **Боровик С. Ю., Секисов Ю. Н., Блинов А. В., Мухутдинов Ф. И.** Особенности преобразования информации в системе контроля частиц износа пар трения на основе кластера одновитковых вихретоковых чувствительных элементов // *Турбины и дизели*. 2017. **73**, № 4. С. 10–17.
13. **Blinov A., Borovik S., Luchsheva M. et al.** Monitoring the state of power plants' friction pairs on the basis of single-coil eddy-current sensors // *Journ. Phys.: Conf. Ser.* 2021. **1891**. 012053.
14. **Пат. 2646520 РФ.** Способ обнаружения металлических частиц износа в потоке масла работающего газотурбинного двигателя /С. Ю. Боровик, И. Г. Коршиков, Ю. Н. Секисов, В. А. Белослудцев. Заявл. 10.01.2017. Оpubл. 05.03.2018, Бюл. № 7.
15. **Трянов А. Е.** Конструкция масляных систем авиационных двигателей: Учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 81 с.
16. **Боровик С. Ю., Коршиков И. Г., Секисов Ю. Н.** О выборе параметров импульсного питания одновиткового вихретокового датчика для обеспечения близкой чувствительности к частицам металла с различной магнитной проницаемостью // *Датчики и системы*. 2021. **256**, № 3. С. 56–62.
17. **Пат. 2668513 РФ.** Способ обнаружения частиц металла в масле системы смазки узлов трения и определения скорости потока масла /С. Ю. Боровик, И. Г. Коршиков, Ю. Н. Секисов, В. А. Белослудцев. Заявл. 29.03.2017. Оpubл. 01.10.2018, Бюл. № 28.
18. **Пат. 2674577 РФ.** Способ обнаружения частиц металла в системе смазки узлов трения силовых установок с разбиением на группы по размерам частиц /С. Ю. Боровик, И. Г. Коршиков, В. А. Белослудцев, Ю. Н. Секисов. Заявл. 18.12.2017. Оpubл. 11.12.2018, Бюл. № 35.
19. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2006. 575 с.
20. **Калашников С. П., Мацвейко А. А.** Фотодиодный измеритель мощности лазерного излучения // *Приборы и техника эксперимента*. 1981. № 2. С. 169.
21. **Модуль Е-440.** Техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: ЗАО «Л-Кард», 2003. 91 с.
22. **Low cost, high speed, rail-to-rail amplifiers AD8051/AD8052/AD8054.** URL: <https://www.farnell.com/datasheets/2005651.pdf> (дата обращения: 25.05.2022).
23. **Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Погрешности дискретизации в системах измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины // *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки*. 2016. **50**, № 2. С. 83–90.

*Поступила в редакцию 25.05.2022*

*После доработки 09.06.2022*

*Принята к публикации 24.06.2022*