

# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.518

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОДОВ В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В КОМПРЕССОРАХ ТУРБОМАШИН

*В.Н. Белопухов, С.Ю. Боровик, П.Е. Подлипов*

ФГБУН «Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук»  
Россия, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61

***Аннотация.** Приводится анализ случайных погрешностей, обусловленных дискретным характером информации, поступающей от одновитковых вихретоковых датчиков в системах измерения радиальных зазоров в компрессорах турбомашин. Для указанных погрешностей получен закон распределения вероятностей и определены основные статистические характеристики. На основе полученных результатов предложена методика оценки вычислительных ресурсов системы измерения и ее быстродействия. Для заданной точности восстановления экстремума огибающей кодов на выходе АЦП при условии сохранения постоянной частоты дискретизации во всем диапазоне изменений скоростей вращения ротора турбомашин и неизменном объеме буферной памяти предложен алгоритм прореживания кодов и определены его параметры.*

***Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, система измерения радиальных зазоров, одновитковый вихретоковый датчик, погрешность дискретизации, статистические характеристики, оценка вычислительных ресурсов.*

### **Введение**

Известны системы измерения радиальных зазоров (РЗ) между торцами рабочих лопаток ротора и статором авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), предназначенные для экспериментальных исследований ГТД в стендовых условиях [1–8]. В таких системах применяются одновитковые вихретоковые датчики (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника, способные работать в экстремальных условиях высоких температур газовоздушного тракта ГТД [1, 8, 9].

Информативным параметром ОВТД является изменение его эквивалентной индуктивности, зависящее от величины РЗ от ЧЭ до контролируемой лопатки. Датчики включаются в измерительные цепи (ИЦ) с импульсным питанием, которые реализуют известный метод первой производной [1]. Далее напряжение на

---

*Валентин Николаевич Белопухов (к.т.н.), старший научный сотрудник.  
Сергей Юрьевич Боровик (д.т.н.), ведущий научный сотрудник.  
Петр Евгеньевич Подлипов, младший научный сотрудник.*

выходе ИЦ преобразуется в цифровые коды, которые в виде входного потока с дискретизацией по времени поступают в систему обработки.

В процессе вращения ротора турбомашины торцы контролируемых лопаток поочередно проходят зону чувствительности ОВТД, что приводит к формированию на выходе ИЦ напряжения, представляющего собой последовательность «импульсов» колоколообразной формы, амплитуда которых характеризует искомый РЗ. Очевидно, что при отсутствии синхронизации моментов опроса ОВТД с частотой вращения ротора турбомашины дискретный характер получения информации о РЗ является причиной возникновения соответствующей погрешности [10], которая носит случайный характер и может быть классифицирована как инструментальная.

Настоящая статья посвящена статистическому анализу погрешностей дискретизации в системах измерения РЗ на основе ОВТД. Это, по мнению авторов, позволит оценить требуемые вычислительные ресурсы при практической реализации систем измерения РЗ в компрессорах ГТД и, как следствие, оптимизировать аппаратную часть систем (по крайней мере, в части блока предварительной обработки информации и данных с ОВТД).

### Анализ погрешностей дискретизации в системах измерения с ОВТД

На рис. 1, а представлено семейство кривых в виде зависимостей кодов АЦП ( $C$ ) при прохождении торцом компрессорной лопатки зоны чувствительности ОВТД для различных значений РЗ (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 мм). Для получения указанных характеристик использовалось специализированное лабораторное автоматическое градуировочное устройство, обеспечивающее контролируемое перемещение торца лопатки относительно ЧЭ ОВТД по трем осям координат с заданной точностью [11]. При этом вращательное движение лопатки относительно ЧЭ ОВТД на реальной силовой установке имитировалось на стенде ее линейным перемещением по оси  $Z$ , что при больших радиусах лопаточных колес компрессора ГТД (порядка 0,5 м и более) и малой зоне чувствительности датчика (не более  $\pm 7,5$  мм для рассматриваемого варианта конструкции ОВТД) вполне оправдано. Имитация изменений РЗ осуществлялась путем перемещения лопатки относительно ЧЭ ОВТД по оси  $Y$ . Начало системы отсчета  $OXYZ$  привязано к геометрическому центру ЧЭ ОВТД.

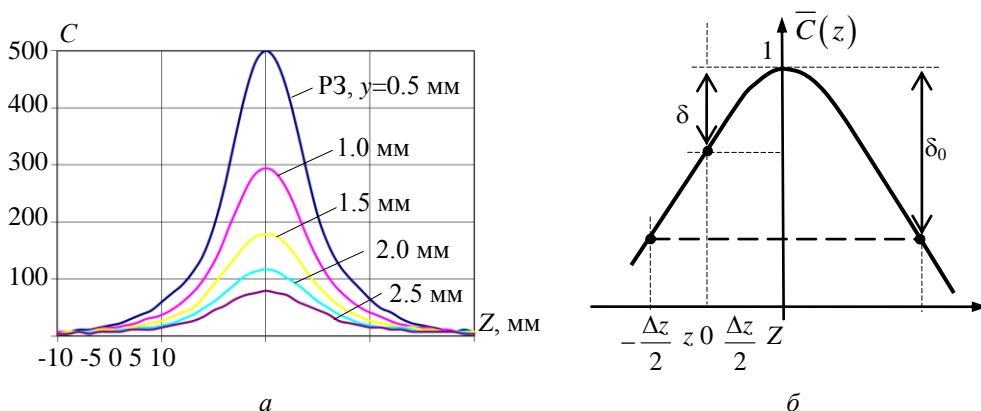


Рис. 1. Зависимость кодов АЦП при прохождении торцом компрессорной лопатки зоны чувствительности ОВТД при различных РЗ (а) и ошибка определения экстремума, связанная с дискретизацией отсчетов по времени (б)

Приведенные на рис. 1, а зависимости  $C(y, z)$  хорошо аппроксимируются кривыми, представленными в виде разделенной формы двух независимых компонент:

$$C(y, z) = A(y) \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (1)$$

где  $y$  – значение РЗ;  $A(y)$  – амплитуда кривой, зависящая от величины РЗ;  
 $\sigma_z$  – параметр, характеризующий ширину гауссовой кривой (для рассматриваемого варианта компрессорной лопатки  $\sigma_z = 1,8$  мм).

Следует отметить, что аппроксимация зависимостей вида рис. 1, а с помощью выражения (1) применима для компрессорных лопаток с наиболее типичными формами пера и торцевой части. В общем случае для произвольной формы лопатки вид аппроксимационной зависимости должен выбираться индивидуально.

Для определения погрешности дискретизации удобно использовать нормированную относительно максимального значения  $A(y)$  компоненту выражения (1), задающую только форму огибающей при движении лопатки под ЧЭ ОВТД:

$$\bar{C}(z) = \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (2)$$

На рис. 1, б в более детальном виде представлена окрестность экстремума  $\bar{C}(z)$ , попадающая в зону между двумя соседними отсчетами, а также даны пояснения для расчета относительной погрешности дискретизации. Как видно из графика рис. 1, б, погрешность дискретизации распределена в диапазоне  $\delta \in [0, \delta_0]$  и принимает свое максимальное значение ( $\delta_0$ ) в случае, когда координата экстремума попадает на середину интервала дискретизации  $\Delta z$ :

$$\delta_0 = 1 - \bar{C}\left(\frac{\Delta z}{2}\right) \quad (3)$$

Для малых  $\Delta z$  (это соответствует практически важному критерию обеспечения  $\delta_0 \leq 5\%$ ) с учетом (2) выражение (3) можно представить в упрощенном виде:

$$\delta_0 \approx \frac{\Delta z^2}{8\sigma_z^2} \quad (4)$$

Очевидно, что величина  $\Delta z$  определяется частотой дискретизации АЦП ( $f$ ) и зависит от скорости вращения лопаточного колеса ( $n$ ). Для заданных  $f$  [Гц] и  $n$  [об/мин]  $\Delta z$  можно найти из

$$\Delta z = \frac{2\pi n R}{60 f} \quad (5)$$

где  $R$  – радиус лопаточного колеса по торцам рабочих лопаток.

Предполагая равновероятный характер попадания экстремума в интервал дискретизации  $\Delta z$ , по известной методике [12] можно получить выражения для плотности распределения вероятности погрешности дискретизации:

$$W(\delta) = \frac{1}{2\sqrt{\delta_0}\sqrt{\delta}} \quad (6)$$

а также интегральной функции ее распределения:

$$F(\delta) = \sqrt{\delta/\delta_0} \quad (7)$$

Следует отметить, что распределение  $W(\delta)$  является усеченным по границе максимальной погрешности и справедливо только для конкретной скорости вращения лопаточного колеса и частоты дискретизации.

Примеры графиков функций  $W(d)$  и  $F(d)$ , нормированной относительно максимального значения погрешности  $d_0$ , приведены на рис. 2. Результаты получены для случая измерений РЗ на лопаточном колесе компрессора радиусом  $R=420$  мм, вращающегося со скоростями 10000 и 20000 об/мин соответственно. Частота дискретизации АЦП составляла 1 МГц.

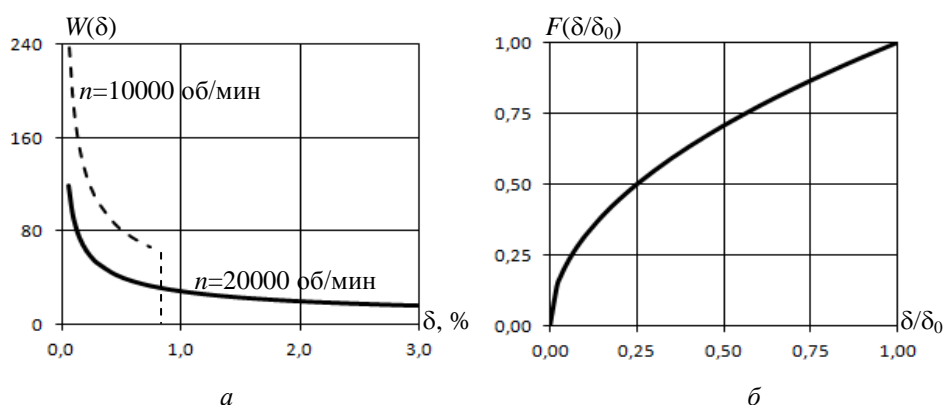


Рис. 2. Плотность распределения вероятности погрешности дискретизации (а) и интегральная функция ее распределения (б)

На основе плотности вероятности могут быть определены другие статистические характеристики для погрешности дискретизации, и в частности математическое ожидание (МО,  $M$ ) и среднее квадратическое отклонение (СКО,  $S$ ):

$$M = \frac{\delta_0}{3} \quad S = \frac{2\delta_0}{\sqrt{45}} \quad (8)$$

В табл. 1 приведены оценки вероятности попадания погрешности дискретизации в характерные интервалы, а на рис. 3 – зависимости максимальной погрешности ( $\delta_0$ ), МО ( $M$ ) и СКО ( $S$ ) от скорости вращения лопаточного колеса компрессора для тех же исходных данных ( $R = 420$  мм,  $f = 1$  МГц), что использовались в примере на рис. 2.

Таблица 1

**Вероятность попадания погрешности дискретизации в характерный интервал**

Интервал	$0 < \delta < M$	$M - S < \delta < M + S$	$M - S < \delta < M + 2S$
Вероятность	0,58	0,79	0,96

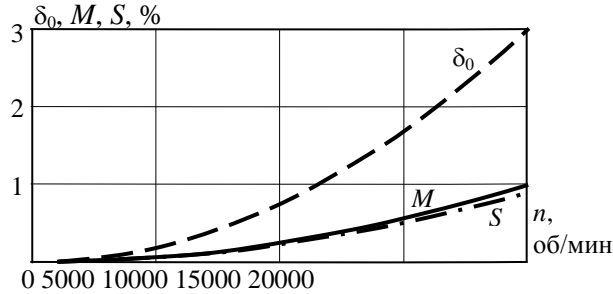


Рис. 3. Зависимости максимальной погрешности ( $\delta_0$ ), МО ( $M$ ) и СКО ( $S$ ) от скорости вращения лопаточного колеса

Как видно из представленных на рис. 3 графиков, указанные характеристики существенно зависят от скорости вращения лопаточного колеса, квадратично возрастают с ее увеличением.

### Оценка вычислительных ресурсов системы измерения

Результаты вычисления статистических характеристик распределения случайной погрешности дискретизации позволяют оценить вычислительные ресурсы системы измерения РЗ, необходимые для предварительной обработки данных. В основу расчета может быть положено условие

$$S \leq \varepsilon_0, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_0$  – допустимое СКО, при котором остаточной погрешностью можно пренебречь.

С учетом (4), (5) выражение для СКО (8) можно представить в виде

$$S = B_0 \cdot \left( \frac{n}{60f} \right)^2 = B_0 \cdot \left( \frac{1}{N} \right)^2 \quad (10)$$

где  $N = (60f) / n$  – число отсчетов за полный оборот ротора;  $B_0$  – константа, содержащая геометрические параметры ротора и лопатки, определяемая в соответствии с выражением

$$B_0 = \frac{1}{\sqrt{720}} \cdot \left( \frac{2\pi R}{\sigma_z} \right)^2. \quad (11)$$

Тогда в соответствии с условием (9) и выражением (10) минимальное число отсчетов АЦП за один оборот ротора турбокомпрессора, необходимое для обеспечения требуемой точности определения экстремального значения кода, соответствующего искомым РЗ, можно определить исходя из условия

$$N \geq \sqrt{B_0 / \varepsilon_0}. \quad (12)$$

Условие (12) определяет минимально допустимый объем буферной памяти, необходимой для хранения требуемой выборки кодов в системе. Так, например, для рассматриваемого случая измерений РЗ на лопаточном колесе компрессора радиусом  $R = 420$  мм, вращающегося со скоростью до 20000 об/мин, для восстановления экстремума огибающей кодов АЦП не хуже  $\varepsilon_0 = 0,25$  % в памяти си-

стемы необходимо хранить  $N_0 \geq 5660$  отсчетов. Зависимость  $N(\varepsilon_0)$  для выбранной задачи измерения представлена на рис. 4.

Полученные оценки позволяют также определить требования к быстродействию системы, и в частности рассчитать требуемую частоту дискретизации АЦП. Легко показать, что для рассматриваемого примера на максимальной скорости вращения лопаточного колеса  $n_{max} = 20000$  об/мин частота дискретизации АЦП должна быть не менее 1,9 МГц.

Очевидно, что при условии сохранения постоянной частоты дискретизации во всем диапазоне изменений скоростей вращения ротора турбомашин на низких оборотах будет передискретизация и потребуются необоснованно завышенный объем буферной памяти. Избежать этого при несинхронизированном с периодом вращения ротора опросом ОВТД и при невозможности динамически менять частоту дискретизации АЦП можно путем прореживания входного потока данных, полученных на максимальной частоте преобразования.

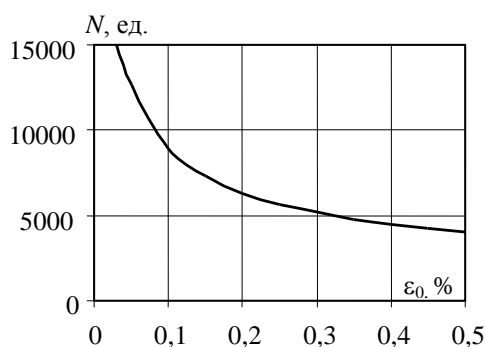


Рис. 4. Зависимость числа отсчетов от заданной погрешности дискретизации

В основу операции сокращения избыточности положено равенство числа отсчетов ( $N$ ) во всем диапазоне скоростей вращения колеса турбокомпрессора, что позволяет определить требуемый коэффициент прореживания кодов ( $K$ ). Очевидно, что  $K$  должен быть целым числом; кроме того, для удобства дальнейшей практической реализации алгоритма прореживания в системе измерения удобно, чтобы он был кратным степени 2. Тогда для текущей  $i$ -той скорости вращения колеса турбокомпрессора коэффициент прореживания может быть определен исходя из выражения

$$K_i = 2^{\lceil \log_2 \left( \frac{n_{max}}{n_i} \right) \rceil}, \quad (13)$$

где  $n_{max}$  – максимальная скорость вращения колеса.

Очевидно, что целочисленность  $K$  приводит к некоторым издержкам и для нормальной работы алгоритма сжатия требует удвоенного объема буферной памяти. Так, например, для рассмотренного выше примера с учетом использования 14-разрядного АЦП требуемая емкость буфера памяти составит  $Q \geq 2 \cdot 2 \cdot 5660 = 22640$  байт.

Ниже приводится оценка распределения СКО погрешности дискретизации в полном диапазоне скоростей вращения ротора с учетом неучтенных дробных частей в аргументе логарифма выражения (15). Для этого введем обобщенную функцию  $\xi(x)$ , равную

$$\xi(x) = \frac{2^{\lceil \log_2 x \rceil}}{x}, \quad (14)$$

где  $x = \frac{n_{max}}{n_i}$ .

Тогда СКО может быть рассчитано по формуле

$$S = B_0 \cdot \left( \frac{\xi(x)}{N} \right)^2. \quad (15)$$

Распределение СКО в зависимости от скорости вращения лопаточного колеса применительно к рассматриваемому примеру для  $\epsilon_0 = 0,25\%$  представлено на рис. 5.

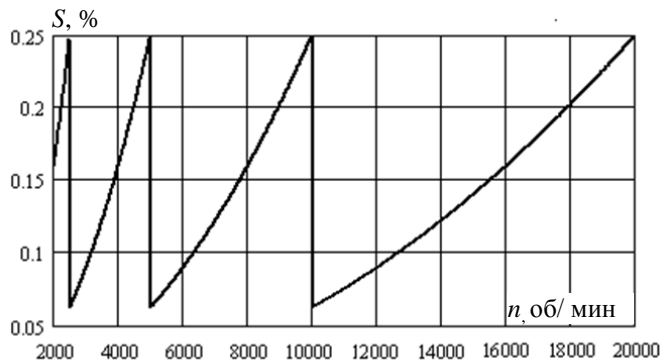


Рис. 5. Распределение СКО погрешности дискретизации в зависимости от скорости вращения лопаточного колеса турбокомпрессора

### Заключение

Рассмотрены случайные погрешности, обусловленные дискретным характером поступления информации от ОВТД, для которых получены закон распределения вероятностей и основные статистические характеристики. На основе полученных статистических результатов предложена методика оценки вычислительных ресурсов системы измерения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю.Н. Секисова, О.П. Скобелева. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2001. – 188 с.
2. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под общ. ред. О.П. Скобелева. – М.: Машиностроение, 2011. – 298 с.
3. Боровик С.Ю., Райков Б.К., Тулупова В.В. Система измерения радиальных смещений торцов лопастей винтовентилятора // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 7. – С. 35–40.
4. Боровик С.Ю., Ильинский С.А., Игначков С.М. [и др.]. Система измерения радиальных зазоров на закапотированной винтовентиляторной установке // Известия вузов. Авиационная техника. – 2004. – № 3. – С. 77–79.
5. Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н. Средства измерения и мониторинга радиальных зазоров в про-

- точной части газотурбинного привода в процессе эксплуатации ГТУ // Газотурбинные технологии. – № 10. – 2008. – С. 24–28.
6. Боровик С.Ю. Система измерения смещений торцов лопаток с распределенным кластером одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – № 4. – 2011. – С. 36–41.
  7. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Райков Б.К. [и др.] Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихретоковых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – № 10. – 2013. – С. 38–46.
  8. Бельский Л.Б., Райков Б.К., Секисов Ю.Н. [и др.]. Одновитковые вихретоковые датчики: от кластерных композиций к кластерным конструкциям // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды VI межд. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2004. – С. 636–641.
  9. Боровик С.Ю., Секисов Ю.Н. Одновитковые вихретоковые преобразователи для измерения механических параметров // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. ак. С. П. Королёва (Национального исследовательского университета). – № 4 (42). – 2013. – С. 94–102.
  10. Боровик С.Ю., Кутейникова М.М., Секисов Ю.Н. [и др.]. Погрешности дискретизации в системах измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 2(50). – С. 83–90.
  11. Белопухов В.Н., Боровик С.Ю., Подлипов П.Е. Аппаратно-программные средства автоматизации экспериментальных исследований семейств градуировочных характеристик систем измерения координат смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVI межд. конф. – Самара: СамНЦ РАН, 2014. – С. 682–686.
  12. Гурский Е.И. Теория вероятностей с элементами математической статистики: Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 1971. – 328 с.

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

## SAMPLING ERRORS ESTIMATION IN THE DETERMINATION OF CODES EXTREME VALUES IN SYSTEMS FOR MEASUREMENTS OF RADIAL CLEARANCES IN COMPRESSORS OF TURBOMACHINES

V.N. Belopukhov, S.Yu. Borovik, P.E. Podlipnov<sup>1</sup>

Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences  
61, Sadovaya str., Samara, 443020, Russian Federation

**Abstract.** *The analysis of random errors caused by discrete character of information from the single-coil eddy-current sensor in systems for measurements of radial clearances in compressors of turbo machines is provided. For the specified errors the distribution law of probabilities is received and the main statistical characteristics are defined. On the basis of this results the technique of assessment of computing resources of the measuring system is offered. For the given accuracy of restoration of an extremum of ADC codes on an output on condition of maintaining constant frequency of sampling in all range of changes of rotational speeds of a rotor of the turbomachine and invariable volume of a buffer memory, the algorithm of decimation of codes is offered and its parameters are determined.*

**Keywords:** *gas-turbine engine, system for measurements of radial clearances, single-coil eddy-current sensor, sampling error, statistical characteristics, computing resources evaluation.*

---

<sup>1</sup>Valentin N. Belopukhov (Ph.D. (Techn.)), Senior Scientist.  
Sergey Yu. Borovik (D.Sc. (Techn.)), Leading Scientist.  
Petr E. Podlipnov, Scientist.



УДК 004.415.25

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА АЛЮМИНИЯ

*А.В. Бочкарев, П.Ю. Зобнин, Е.Е. Ярославкина*

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

**Аннотация.** Рассматривается методика получения информативных данных из сигнала акустической эмиссии, измеряемого во время кристаллизации деформируемых сплавов алюминия. Описывается необходимость внедрения данного метода на предприятиях, актуальность проблемы отсутствия оперативного контроля размера зерна и механических свойств заготовок из алюминиевых деформируемых сплавов. Выявляются наиболее значимые алгоритмы анализа сигналов акустической эмиссии, производится выбор необходимых для реализации. Формируется блок-схема требуемых алгоритмов, приводится описание отдельных блоков. Указываются необходимые поправки для возможности реализации на аналого-цифровом преобразователе со встроенным цифровым сигнальным процессором сформированных алгоритмов в виде программы. Приводится пример тестирования полученного программного обеспечения по обработке случайного сигнала.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, деформируемые сплавы алюминия, столбы, аналого-цифровой преобразователь, цифровой сигнальный процессор, число событий.

Одна из важных отраслей металлургического предприятия – производство заготовок из деформируемых алюминиевых сплавов, широко используемых для создания профилей различной формы под давлением [1]. Конечным результатом обработки сырья являются цилиндрические столбы высотой в несколько метров и диаметром порядка 150 мм.

В общем виде создание столба состоит из трех этапов – плавка алюминиевой чушки, литье столба и гомогенизация полученной заготовки. Столбы изготавливают с помощью литейного стола, как это показано на рис. 1.

Из печи 1 расплавленный алюминий 2 с помощью фильтра 3 подается на литейную чашу 4, представляющую собой резервуар с отверстиями в местах наличия желобов 5. Последние служат для распределения жидкого алюминия и подачи его в отверстия кристаллизатора 6, который используется для равномерного охлаждения расплава. По завершении операции формирования столбов весь литейный стол, состоящий из кристаллизатора и литейной чаши с желобками, поднимается посредством крюков 7, чтобы достать готовые столбы 8 [1].

Таким образом, процесс формирования партии алюминиевых заготовок протекает непрерывно, верхняя часть алюминия в кристаллизаторе находится в жидком агрегатном состоянии, тогда как нижняя часть уже кристаллизовалась, между этими зонами существует фронт кристаллизации [2].

---

*Андрей Владимирович Бочкарев, магистрант.*

*Павел Юрьевич Зобнин, магистрант.*

*Екатерина Евгеньевна Ярославкина (к.т.н.), заведующая кафедрой «Информационно-измерительная техника».*

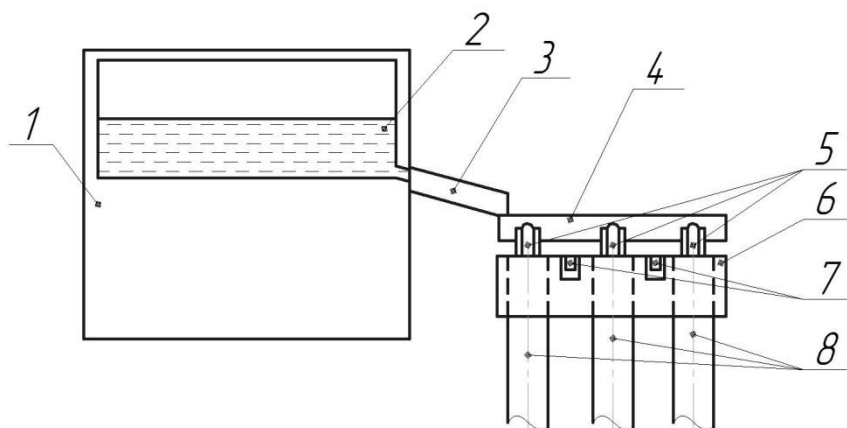


Рис. 1. Схема печи и литейного стола для выплавки алюминиевых столбов:  
 1 – печь; 2 – жидкий металл; 3 – фильтр; 4 – литейная чаша; 5 – желоба; 6 – кристаллизатор;  
 7 – крюки; 8 – алюминиевые столбы

Полученные столбы проходят гомогенизацию в течение суток для устранения микронеоднородностей и снятия возникших напряжений. Готовая продукция проходит тестирование относительно заданных стандартов – измеряются химический состав и размер зерна. Оба данных параметра определяют в дальнейшем механические свойства изготовленных из полученных столбов изделий, и в случае несоответствия полученных данных требуемым значениям вся партия отправляется на переплавку.

Химический состав чаще всего измеряют у отдельного небольшого образца путем отбора пробы непосредственно из печи [3]. Это позволяет избежать переплавки заготовок и дает возможность внести коррективы в состав еще до кристаллизации.

Для измерения же размера зерна необходимо в партии выбрать гомогенизированный столб и вырезать из него часть небольшой толщины, провести шлифовку поверхности основания, протравить и тем или иным образом измерить средний по сечению размер зерна [2]. Процедура занимает порядка нескольких часов работы. Дальнейшая обработка заготовок не осуществляется без получения сведений о размере зерна.

Описанный способ контроля размера зерна имеет явный недостаток: измерение после кристаллизации не позволяет вносить коррективы в расплав, то есть вся партия при несоответствии требованиям идет на переплавку, вызывая дополнительные расходы. Также сам процесс измерения размера зерна является сравнительно затратным и сопряжен с простым предприятием.

Кроме размера зерна при контроле на пригодность использования данной партии для изготовления продукции также проводят и испытания по получению механических свойств заготовок. Эти испытания могут проводиться от 1 до 5 дней, и в случае негативных результатов вся партия так же, как и при несоответствии размера зерна, отправляется на переплавку. Поскольку простой длиной даже в сутки оказывается недопустимым для металлургических предприятий, партия при получении удовлетворительных результатов по другим параметрам

отправляется на следующий этап цикла производства, без ожидания непосредственно результатов тестирования механических свойств.

Таким образом, механические свойства являются потенциально самым необходимым для экспресс-контроля параметр: при его несоответствии убытки представляют собой затраты не только на переплавку, но и на оплату рабочего времени, а также энергоресурсы, участвующие в последующей обработке заготовок.

Для устранения данных недостатков в рамках междисциплинарной проектной команды СамГТУ «Акустико-эмиссионная установка (акустико-эмиссионный аналитический комплекс) для прогнозирования в процессе литья размеров макро- и микрочастиц в алюминиевых сплавах» ведутся работы по созданию установки определения размера зерна и его механических свойств до наступления кристаллизации всего столба [5]. Данный комплекс предназначен для восприятия и обработки сигналов акустической эмиссии [6]. Они измеряются с момента начала процесса отливки столбов. При несоответствии сигнала заданным параметрам в технологию литья вносятся коррективы, в результате чего предприятие может избежать потерь на обработку бракованной продукции.

Обзор применяемых на сегодняшний день методов анализа сигнала акустической эмиссии показал, что наиболее значимыми (в порядке убывания распространенности) являются: суммарное число событий, число событий в единицу времени, плотность энергии, эволюция спектра, эволюция вейвлет-коэффициентов, дисперсионные кривые [7].

Получение данных и вычислительные операции выполняются в измерительном преобразователе напряжений *L-Card E-502-P-EU-D* (далее *E502*). Он представляет собой систему сбора данных с интегрированным быстродействующим аналого-цифровым преобразователем (АЦП) последовательного приближения (максимальная частота преобразования 2 МГц) [8]. Кроме АЦП одним из важнейших блоков преобразователя является встроенный цифровой сигнальный процессор (далее ЦСП) [9]. В качестве микросхемы АЦП используется *AD7622* последовательного приближения, а в качестве ЦСП – *Blackfin BF523*. Последний позволяет реализовать различные алгоритмы непосредственно внутри преобразователя, оставляя за компьютером или иным подключенным к нему ЭВМ лишь задачи отображения, управления и принятия решений.

Для обработки данных акустической эмиссии было принято на текущем этапе внедрить два алгоритма подсчета событий как импульсов, превышающих некоторый порог: за все время и за отдельные промежутки времени. Выбор был сделан исходя из анализа первых опытов: амплитуда отдельных импульсов соответствующих событий отличалась сравнительно слабо, чтобы считать ее информативным параметром. При отсутствии необходимости учитывать амплитуду наиболее емкими являются алгоритмы подсчета числа событий. К тому же по числу событий также измеряется смежный с механическими свойствами параметр пористости алюминия, описанный в [10]. Разработанные алгоритмы выявления представлены на рис. 2.

Данный алгоритм учитывает особенности работы *E502* – преобразователь позволяет получать те или иные данные только для каких-либо каналов, поэтому результаты счета событий подменяют собой данные с двух каналов АЦП. Здесь  $d1[i]$ ,  $d2[i]$  и  $d3[i]$  –  $i$ -е элементы массивов данных, переданных с АЦП на ЦСП и затем на ЭВМ от последнего;  $size$  – размер массивов данных (для всех каналов идентичен).

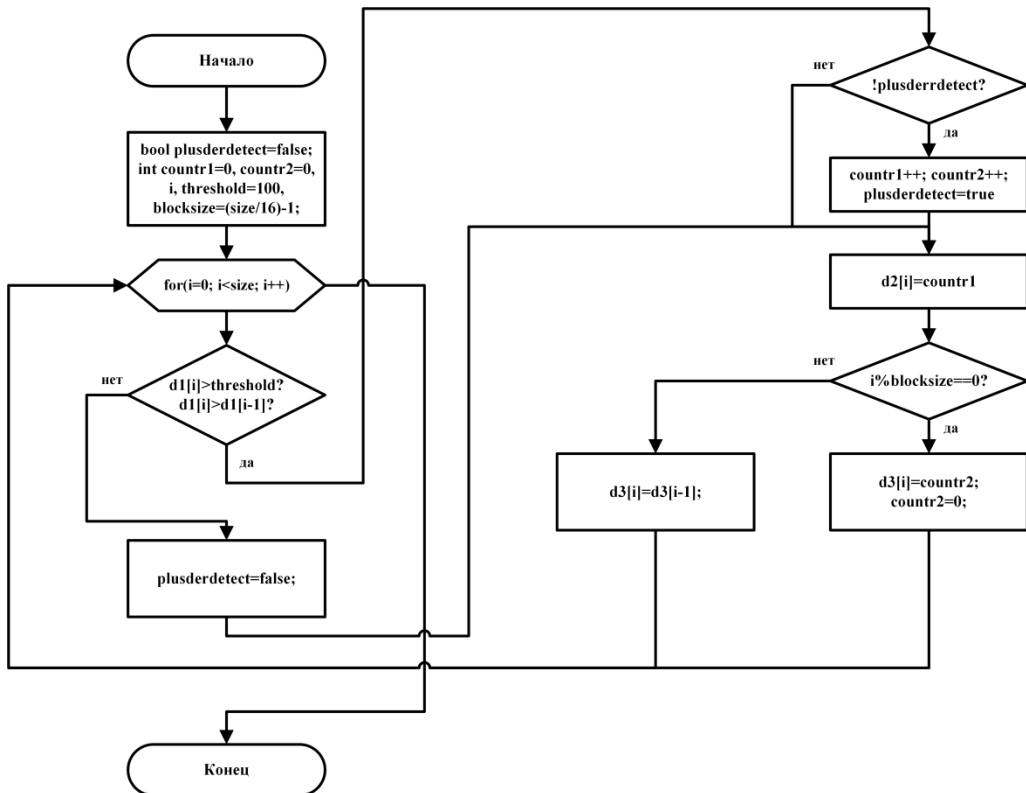


Рис. 2. Блок-схема подсчета числа событий

Описать работу алгоритма можно следующим образом. Перед началом преобразований объявляются целочисленные переменные: два счетчика событий  $countr1=0$  и  $countr2=0$ , итератор  $i$ , пороговое значение  $threshold=100$ , а также размер блока для подсчета числа событий в единицу времени  $blocksize=(size/16)-1$  (имеется в виду, что число событий подсчитывается для каждой  $1/16$  части передаваемого на ЭВМ массива). Также объявляется и инициализируется логическая переменная для определения положительного знака производной (или роста кривой)  $plusderdetect=false$ . Далее все операции выполняются в цикле: при выявлении превышения текущим значением элемента массива  $d1[i]$  порогового значения  $threshold$  (в алгоритме это произвольно взятое число 100), что говорит о выбросе, а значит, и наличии события, производится сравнение текущего элемента массива  $d1[i]$  с предыдущим значением  $d1[i-1]$  для выявления роста кривой. Если какое-либо из условий не выполняется ( $d1[i]$  не превышает  $threshold$  или  $d1[i-1]$ ), то выполняется операция  $plusderdetect=false$ , что необходимо для исключения повторной обработки одного и того же импульса. Если же условия выполняются, то происходит сравнение  $!plusderdetect$ , то есть определяется, было ли уже зафиксировано рассматриваемое событие ранее. Если условие удовлетворяется, то выполняется инкремент счетчиков событий  $countr1$  и  $countr2$ , а также присваивается значение  $plusderdetect=true$  (дабы исключить обработку текущего события второй раз), если не удовлетворяется – то данные операции пропускаются и алгоритм переходит к следующему шагу. Также к этому шагу алгоритм приходит после озвученной ранее операции

*plusderdetect=false*. На текущем этапе выполняется присвоение значения  $d2[i]=count1$ , то есть в  $i$ -е значение массива, соответствующего второму каналу прибора, записывается суммарное число событий за все время. После этого производится сравнение результата выполнения операции  $i \% blocksize$  с нулем, что дает возможность выполнить последующие операции только во время обработки каждого  $blocksize$ -го элемента  $d1[]$ . В данном случае такой подход позволяет выполнять операции 16 раз за один переданный массив. При кратности текущего значения итератора  $i$  величине  $blocksize$  текущему значению массива  $d3[i]$  присваивается значение  $count2$ , после чего  $count2$  обнуляется. Обнуление необходимо, поскольку соответствующий третьему каналу массив  $d3[]$  должен содержать значения, характеризующие число событий в единицу времени. Если итератор не кратен, то текущему значению  $d3[i]$  присваивается предыдущее значение  $d3[i-1]$  и цикл переходит к следующей итерации.

Описанный алгоритм при реализации его на языке программирования C для ЦСП позволяет получить следующие кривые (рис. 3).

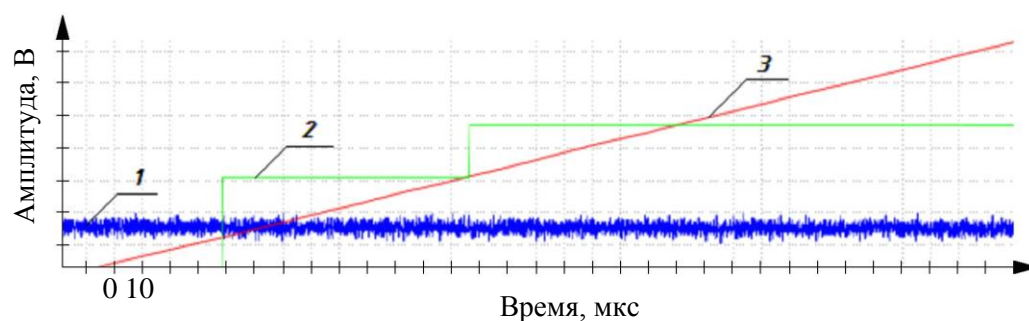


Рис. 3. Входной сигнал и его отображения:  
1 — измерительный сигнал; 2 — число импульсов в единицу времени;  
3 — число импульсов за все время

На данный момент алгоритм дает изображенные на рис. 3 кривые при подаче на его вход псевдослучайного сигнала (шума). На данном этапе алгоритм не содержит фильтров, детектирование события производится исключительно на основании амплитуды импульсов. Тем не менее участниками междисциплинарных проектных команд ведутся работы по определению необходимых параметров частотного фильтра, который будет в ближайшее время внедрен в алгоритм и, как следствие, в программу.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник конструктора. Книга 1. Машины и механизмы: Учеб.-практ. пособие / В.Н. Феценко. — М.: Инфра-Инженерия, 2016. — 400 с.
2. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. — М.: Мир, 1967. — 170 с.
3. Кушнарченко П.О., Дёмкина Е.А. Определение химического состава цветных сплавов в современных условиях производства // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. XI междунар. студ. науч.-практ. конф. № 11. URL: <http://sibac.info/archive/technic/11.pdf> (дата обращения: 30.11.2017).
4. Жекамухов М.К., Шокаров Х. Б. Акустические волны кристаллизации и плавления веществ. — Нальчик: ЕБГУ, 1997. — 303 с.
5. Ланге П.К., Ярославкин А.Ю. Система для измерения размера зерна металлического сплава с использованием аппроксимационного спектрального анализа сигнала акустической эмиссии

- кристаллизации // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 2(34). – С. 68–74.
6. *Грешников В.А., Дробот Ю.Б.* Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 276 с.
  7. Акустические методы контроля и диагностики. Часть II: Учеб. пособие / *Л.А. Оглазнева, А.Н. Калиниченко.* – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 292 с.
  8. *Федорков Б.Г., Телец В.А.* Микросхемы ЦАП и АЦП. Функционирование, параметры, применение. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
  9. *Солонина А.И., Улахович Д.А., Яковлев Л.А.* Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов. – СПб: БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.
  10. *Воронцов В.Б.* Акусто-эмиссионный анализ содержания водорода в расплавах алюминия // *Металлургия машиностроения.* – 2002. – № 5. – С. 5–7.

*Статья поступила в редакцию 27 января 2018 г.*

## **DEVELOPMENT OF METHOD AND SOFTWARE FOR DETERMINING THE SIZE OF GRAIN OF ALUMINUM**

***A.V. Bochkarev, P.Y. Zobnin, E.E. Yaroslavkina***

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

***Abstract.*** *The paper considers a technique for obtaining informative data from the acoustic emission signal measured during the crystallization of deformed aluminum alloys. The need for introduction of this method to enterprises, the urgency of the problem of the lack of operational control of the grain size and the mechanical properties of billets from aluminum deformable alloys is described. The most significant algorithms for analyzing acoustic emission signals are identified, and the choice necessary for implementation is made. A block diagram of the required algorithms is formed, a description of the individual blocks is given. The necessary corrections are indicated for the possibility of implementing the generated algorithms in the form of a program on an analog-to-digital converter with an integrated digital signal processor. An example of testing the received software for processing a random signal is given.*

***Keywords:*** *acoustic emission, deformed aluminum alloys, poles, analog-to-digital converter, digital signal processor, number of events.*

---

*Andrey V. Bochkarev, Graduate Student.*

*Pavel Y. Zobnin, Graduate Student.*

*Ekaterina E. Yaroslavkina (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 681.518.5

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ИХ РАДИАЛЬНЫХ БИЕНИЙ

*Э.С. Гаспаров, В.И. Петрунин*

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

**Аннотация.** Разработан экспериментальный стенд для воздействия на ротор и для получения его реакции в виде сигналов виброускорения методом тестового диагностирования. С использованием современных аппаратных средств была разработана информационно-измерительная система для стенда. В результате экспериментального поиска контролеспособных диагностических точек были получены сигналы виброускорений при воздействии по корпусу узла ротора в области передней и задней опор, а также и по средней части. Экспериментально доказано, что точка на корпусе у передней опоры является контролеспособной, и показана обоснованность использования критерия в виде относительной частоты пика для определения значения предварительного натяга опор узла ротора при воздействии в области передней опоры.

**Ключевые слова:** высокоскоростной ротор, подшипники качения, импульсные воздействия, виброускорение, предварительный натяг, пиковая частота, спектральные характеристики, частота вращения ротора.

Динамическое качество и параметрическая надежность высокоскоростных роторов во многом зависят от подшипников качения, установленных в опорах, которые, в свою очередь, лимитируют ресурс и надежность узлов. Состояние подшипников является наиболее значимым фактором, влияющим на виброакустическую картину узла ротора. И, как следствие, анализ состояния опор исследуется методами виброакустической диагностики. Состояние подшипниковых опор во многом определяется предварительным натягом (далее - преднатяг). Правильно подобранный преднатяг подшипниковых опор обеспечивает стабильный температурный режим работы узла ротора, минимальную погрешность вращения ротора и динамическое качество, сохраняет их неизменность с течением времени, т.е. обеспечивает параметрическую надежность роторного узла в целом.

Ранее, в работах [1-3], уже были описаны результаты исследования высокоскоростного шлифовального электрошпинделя с опорами качения на предмет влияния преднатяга на виброакустическую картину и динамические характеристики узла. Целью настоящего эксперимента являлась оценка возможности контроля электрошпинделя, т.е. выполнялся поиск лучших контрольных точек конструкции узла для тестовых воздействий с целью получения большей полезной информации о состоянии узла. К тому же на некоторых моделях электрошпинделей вылет шпинделя может быть мал настолько, что сделало бы невозможным

---

*Эрик Сергеевич Гаспаров (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Транспортные процессы и технологические комплексы».*

*Владимир Иванович Петрунин (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы».*

тестовое воздействие по переднему концу шпинделя. Следует отметить, что в рамках данного эксперимента дискретные воздействия силой применялись и по корпусу шпиндельного узла: у передней опоры, в районе задней опоры и в средней области корпуса.

Схема стенда для эксперимента и дискретных воздействий по корпусу электрошпинделя приведена ниже на рис.1.

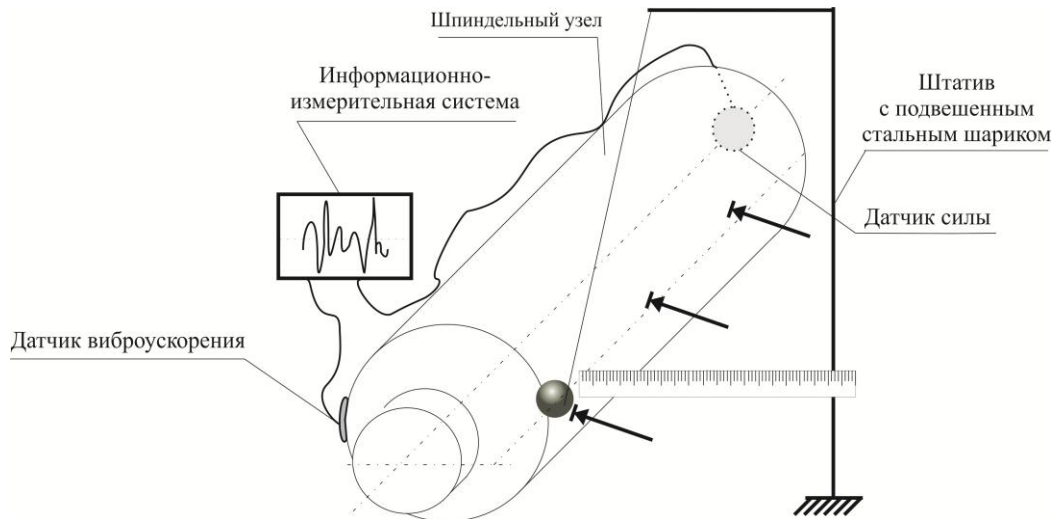


Рис. 1. Схема экспериментального стенда при импульсных воздействиях

Объектом исследования был высокоскоростной шлифовальный электрошпиндель отечественного производства, жестко закрепленный на массивном столе из чугуна. В его передней и задней опорах установлены одинаковые одиночные радиально-упорные подшипники 76101E второго класса точности. Задняя опора является плавающей. Акселерометр резьбовым соединением был закреплен на корпусе (над передней опорой шпинделя) на одной оси с вектором приложенного удара. Для измерения и контроля усилия преднатяга в электрошпиндель был установлен датчик силы между пружиной преднатяга и регулировочным винтом. Для получения и сохранения информации в виде откликов виброускорения использовалась информационно-измерительная система, состоящая из датчика виброускорения AP98 с встроенной электроникой стандарта ICP, датчика силы, модулей NI 9234 и NI 9219, контроллера (шасси) NI cDAQ 9172 и программного обеспечения National Instruments Sound and Vibration Assistant [4]. Датчик виброускорения подключался к модулю NI 9234. Датчик силы MLB13, установленный между пружиной преднатяга и регулировочным винтом, является тензодатчиком, собранным по полно-мостовой схеме, выход которого подсоединялся к одному из каналов модуля NI 9219. Дискретные воздействия в область передней и задней опор и в середину корпуса наносились по линии параллельно главной продольной осевой линии шпинделя и находящейся с ней на одной горизонтальной плоскости, параллельно плоскости чугунного стола (рис. 1).

В настоящем эксперименте, были нанесены по три дискретных воздействия по корпусу, в район передней опоры, для каждого из пяти значений преднатяга: 0 Н; 6 Н; 24 Н; 36 Н; 56 Н. Были получены временные реализации и про-



веден их спектральный анализ. Полученные спектральные характеристики временных реализаций для пяти значений преднатяга приведены ниже на рис.2.

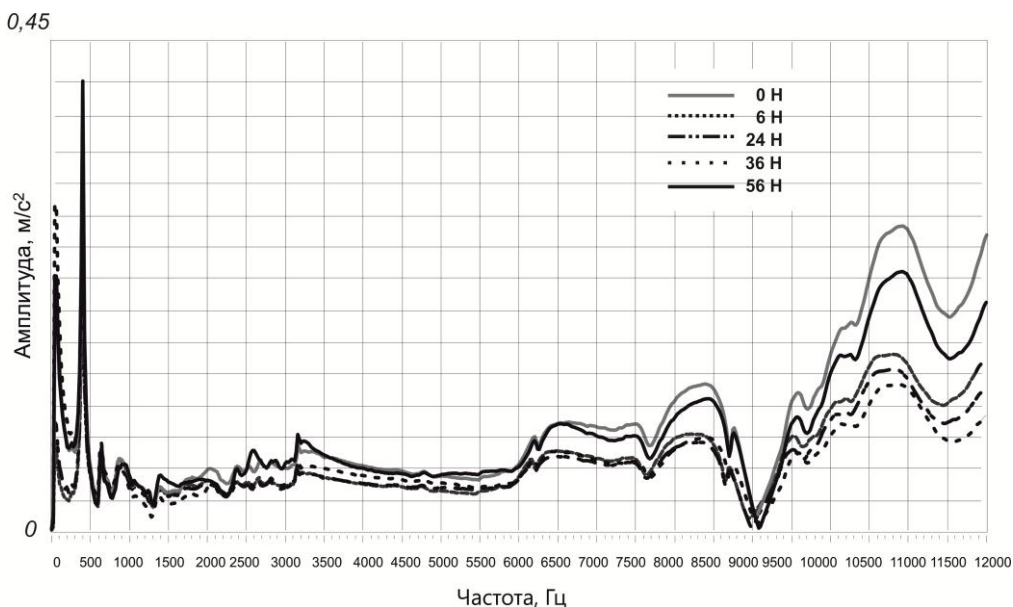


Рис. 2. Спектр сигнала отклика при нанесении кратковременного импульсного воздействия по корпусу в область передней опоры

Анализ показал, что для всех значений преднатяга энергия сигналов виброускорений сосредоточена в основном на частоте 0,4 кГц. Настоящая резонансная частота не меняется при изменении преднатяга, а значит не зависит от контактной жесткости подшипниковых опор, и, вероятнее всего, формируется массожесткостной системой с неизменными параметрами.

Спектральный анализ на рис.2 показывает, что при близких амплитудных значениях на частоте 0,4 кГц, амплитуды частот на интервале от 3 до 6 кГц отличаются более чем в десять раз. Участок АЧХ от 3,2 до 4,2 кГц, является частотным интервалом который больше всего зависит от преднатяга, в случае нанесения ударов по переднему концу шпинделя, при дискретном воздействии силой на переднюю опору имеет наиболее равномерную и стремящейся к линейной характеристику (рис.2). Это свидетельствует о том, что при дискретном воздействии в район передней опоры корпуса, частоты в этом диапазоне плохо возбуждаются. При детальном визуальном анализе настоящего интервала частот приходим к выводу, что угол наклона спектральной огибающей к оси абсцисс с увеличением преднатяга уменьшается.

В результате проведенного эксперимента при кратковременных дискретных воздействиях силой в среднюю часть корпуса были получены временные реализации виброускорений при значениях преднатяга 80 Н; 100 Н; 120 Н. Методом гармонического анализа с помощью средств графического программирования LabView для полученных временных сигналов были определены их спектральные характеристики. Частотный состав полученных временных реализаций более равномерный и с менее выраженными резонансными частотами. Очевидно, связано это с тем, что корпус узла имеет лакокрасочное покрытие, которое является паразитным гасителем, т.е. демпфирует колебания. А в случае с шлифоваль-

ным электрошпинделем в производственных условиях воздействие по корпусу узла гасится за счет наличия в полости корпуса жидкости, охлаждающей обмотки статора.

Подобные результаты были получены при нанесении тестовых воздействий стальным шариком по корпусу узла в область задней опоры. Спектральные характеристики полученных временных сигналов при значениях преднатяга 0 Н; 80 Н; 100 Н говорят о том, что возбуждаются частоты на интервале от 5000 Гц и выше. Значения резонансных частот не меняются и не зависят от значения преднатяга опор.

Для случаев, когда воздействие было нанесено в середину корпуса и в область задней опоры, поиск частот и частотных интервалов, зависящих от значений преднатяга проведенный анализ не дал определенных результатов. В итоге можно сделать вывод, что контрольными точками для дискретных воздействий при тестовой диагностике узла, с целью обеспечения динамических характеристик, могут являться точки на поверхности переднего конца шпинделя и точки на корпусе узла, которые максимально близки к передней опоре шпинделя.

В итоге проведенных исследований и анализа динамических характеристик полученных временных реализаций, для обеспечения динамического качества роторов нужно провести следующие мероприятия:

1. На этапе сборки и ремонтных восстановительных работ, а в случае когда организован мониторинг за состоянием роторов и в перерывах их работы, необходимо проводить диагностику состояния опор роторов и определять значение их преднатяга. Диагностику необходимо проводить путем нанесения тестовых дискретных воздействий по переднему концу ротора. При нанесении дискретного воздействия необходимо обеспечить, чтобы мгновенная амплитуда сигнала отклика не превышала динамический размах используемого акселерометра и не деформировала элементы роторов. В случае, когда невозможно дискретно воздействовать по переднему концу ротора, в качестве второй точки для воздействия необходимо выбрать точку на корпусе на передней опоре ротора. Точка контроля не должна иметь лакокрасочного покрытия и демпфировать воздействие. При этом нужно обеспечить, чтобы вектор дискретного воздействия силой и рабочая ось акселерометра находились в одной плоскости.

2. Исследовать полученные временные реализации нужно методом гармонического анализа. На базе спектра амплитуд или спектра мощности определить резонансные частотные диапазоны для всего интервала значений преднатяга подшипников качения используемых в диагностируемом узле ротора, для которого обеспечиваются или улучшаются динамические характеристики. При этом качественно определить резонансные частоты возможно только по спектру реализаций, полученных при дискретном воздействии на передний конец ротора. Обороты вращения выбирать таким образом, чтобы частота вращения ротора, а также и другие частоты основных вынужденных колебаний опор качения, не попадали в зоны резонанса роторного узла. К примеру, для шлифовального электрошпинделя с подшипниками качения 76101Е второго класса точности, который использовался в эксперименте, заявленные заводом изготовителем рабочие частоты вращения ротора от 60 т. до 100 т. об/мин. Путем анализа спектральной характеристики для данного шпиндельного узла выбраны эксплуатационные режимы, при которых будут не только обеспечиваться динамические характеристики узла, но и повышаться за счет уменьшения вибрационной активно-

сти. Результаты зависимостей частот вращения электрошпинделя от значения преднатяга приведены в виде табл.1. и на рис. 3.

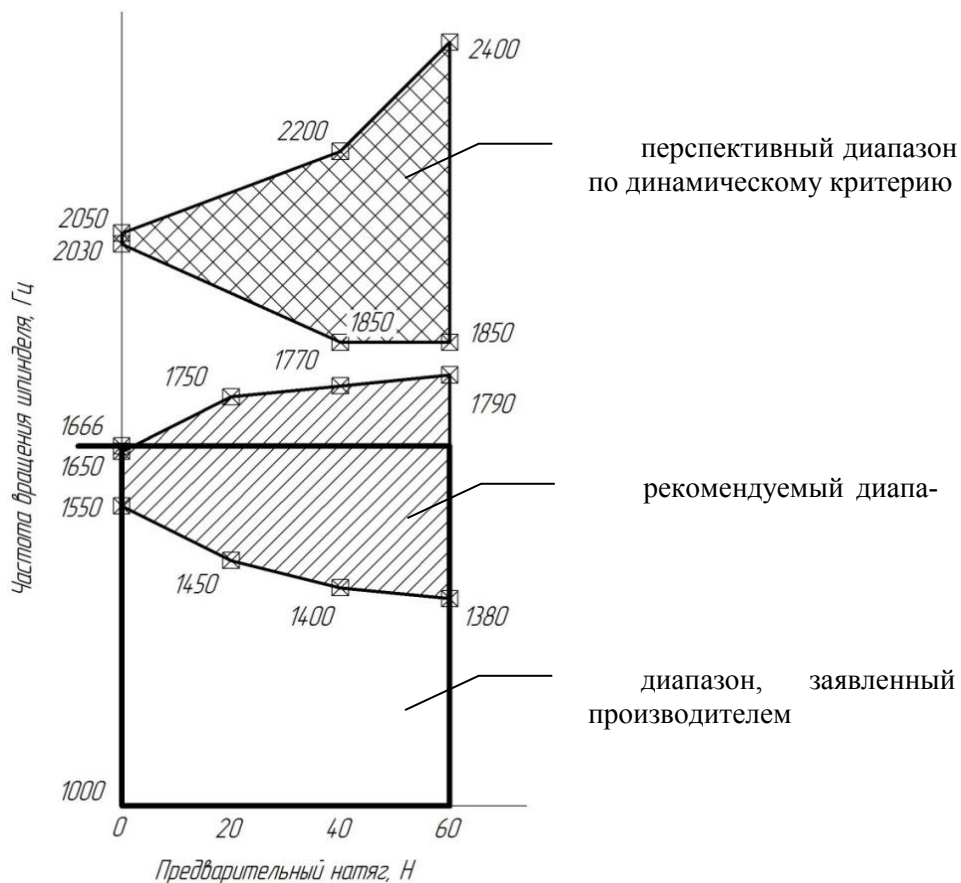


Рис. 3. Зависимости частот вращения электрошпинделя от значения преднатяга

В таблице в строке «рекомендуемые частоты вращения шпинделя» вторым рядом приведены диапазоны частот, которые могут быть рабочими частотами вращения шпинделя исследуемого узла при условии, что будут решены задачи по отводу увеличенных тепловых выделений опор и своевременного подвода смазки, а также охлаждения обмоток статора. Применение предлагаемых частот вращения, при соответствующих значениях преднатяга, могут значительно повысить производительность электрошпинделя, сохраняя динамические характеристики узла.

С ростом преднатяга расширяется диапазон рекомендуемых частот вращения шпинделя. Для всего интервала значений преднатяга верхние и нижние границы рекомендуемых диапазонов частот находятся выше по частотной оси соответствующих границ частотных диапазонов вращения электрошпинделя, заявленных заводом изготовителем. Для улучшения динамических характеристик узла, из заявленного заводом изготовителем интервала рабочих частот вращения шпинделя от 60 т. до 100 т.об/мин следует вообще исключить диапазон частот

вращения от 60 т. до 75 т.об/мин. т.к. он перекрывается с зоной собственных резонансных частот электрошпинделя на интервале от 0,85 до 1,25 кГц. Использование электрошпинделя на оборотах вращения от 51 т. до 75 т. об/мин ведет к росту вибрационной активности ШУ и как вывод к ухудшению его динамических характеристик.

### Зависимости частот вращения электрошпинделя от значения предварительного натяга

Предварительный натяг $P_n$ , Н	0+	20+	40+	60+
Рекомендуемые частоты вращения, т. об/мин	93-99 121,8 - 123	87-105	84 -106,2 111 - 132	82,8-107,4 111 - 144
Интервал частот вращения, заявленный производителем, т. об/мин	60 - 100	60 - 100	60 - 100	60 - 100

3. Для выбора рациональных частот вращения высокоскоростных роторов, с целью уменьшения их радиальных биений, необходимо определить значение преднатяга опор роторов. Для этого необходимо вычислить относительную пиковую частоту, которая вычисляется как абсцисса центра тяжести соответствующих резонансных интервалов спектра сигнала. Для автоматизации контроля (без разборки узла) значений преднатяга опор однотипных роторов и обеспечения их динамического качества, необходимо предварительно создать базу эталонных значений критерия в виде относительной частоты пика и соответствующих ей значений преднатяга.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гаспаров Э.С.* Методика определения усилия предварительного натяга подшипниковых опор шпиндельного узла / Э.С. Гаспаров, А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2 (42). – С. 94–98.
2. *Гаспаров Э.С.* Экспериментальная оценка зависимости вибродиагностических параметров шпиндельного узла от величины предварительного натяга его опор / Э.С. Гаспаров, А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 2(46). – С. 152–158.
3. *Гаспаров Э.С.* Определение усилия предварительного натяга подшипниковых опор шпиндельного узла методом виброакустической диагностики / Э.С. Гаспаров, А.Ф. Денисенко, Л.Б. Гаспарова // Вестник машиностроения. – 2015. – Вып. 12. – С. 152–158.
4. *Жуков К.Г.* Модельное проектирование встраиваемых систем в LabVIEW: Учеб. курс. – М.: ДМК-Пресс, 2011. – 688 с.

*Статья поступила в редакцию 16 января 2018 г.*

## **RATIONAL FREQUENCIES OF ROTORS ROTATION DETECTION FOR THE MINIMIZE THEIR RADIAL RUNOUT**

***E.S. Gasparov, V.I. Petrunin***

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

***Abstract.*** An experimental stand to influence the rotor and to obtain its reactions in the form of vibration acceleration signals with the method of testing was developed. Using modern hardware, the information-measuring system for the stand was developed. The vibration acceleration signals were obtained when exposed to the rotor assembly unit at the anterior and posterior supports and along the middle part of the body unit, which became the result of the experimental search for the control capable diagnostic points. The experiment proved that the point on the front support of the body unit is control capable. The validity of using the criterion in the form of the relative peak frequency for determining the value of the preload of the assembly unit supports at exposition in the area of the front support is shown.

***Keywords:*** high speed rotor, ball bearings, impulse actions, the acceleration sensor, preload force, peak frequency, spectral characteristics, amplitude-frequency characteristic, no-load conditions, peak frequency, relative power.

УДК 621.317

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАЗМЕРОВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ  
В ПОТОКЕ НЕФТИ НА БАЗЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА\*****П.К. Ланге, А.С. Паутова**Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

**Аннотация.** Рассматривается ультразвуковая система, регистрирующая в нефтяном потоке наличие частиц примесей, а также оценивающая их размеры. Описана структура измерительной системы, содержащей матрицу излучающих и приемных пьезоэлементов, которые формируют набор ультразвуковых лучей, сканирующих все сечение нефтепровода. Приведены экспериментальные данные о параметрах твердых частиц в потоке нефти, предложен ультразвуковой метод определения этих параметров. Оценены параметры частиц в потоке нефти, регистрируемых описываемой системой. Определена модель ультразвукового сигнала в рассматриваемой системе, показана возможность определения размеров и количества твердых частиц минералов, а также парафинов в потоке нефти в нефтепроводе. Предложена аппроксимационная модель ультразвукового сигнала в измерительной системе, определена возможность использования такой системы в нефтяной индустрии.

**Ключевые слова:** модель сигнала, ультразвуковой метод, электроакустические преобразователи, матрица пьезоэлементов, сканирование сечения, твердые частицы.

В настоящее время актуальной является задача определения наличия твердых частиц в нефтяном трубопроводе диаметром до 1000 мм [1]. В нефтяном потоке могут находиться различные твердые включения (частицы песка, глины, парафина). Оперативное их определение позволит с высокой эффективностью оптимизировать технологические параметры подготовки (очистки) нефти.

В настоящей статье рассматривается измерительная система, оценивающая количество твердых частиц в ее потоке.

В составе транспортируемой нефти присутствуют различные компоненты примесей (глина, парафин, песок). Согласно данным лабораторных исследований [6] присутствующие компоненты в составе нефти разделяются по размеру от 2 до 20 мм (табл. 1.)

Согласно лабораторным исследованиям, на Ван-Еганском месторождении в составе нефти высока концентрация механических частиц. На абразивные свойства механических примесей влияют гранулометрический состав, в который входит распределение частиц по размеру, твердость, характеристика абразивных свойств частиц, а также их минеральный состав: содержание различных обломков горных пород (кварца, графита, песка), твердость, плотность и размер частиц, их сферичность, острота граней. За рубежом в качестве абразивной харак-

---

\*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-08-00252А, 18-08-00253А.

Петр Константинович Ланге (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».

Анна Сергеевна Паутова, инженер института заочного образования СамГТУ.

теристики частиц используется так называемый коэффициент абразивности (рис. 1, рис. 2) [7].

Таблица 1

**Лабораторные данные о твердых примесях**

Количество твердых частиц	Диаметр частиц, мм	Объем частиц, мм <sup>3</sup>
70	2	4,19
65	3	14,13
60	4	33,49
55	5	65,42
50	6	113,04
45	7	179,50
40	8	267,95
35	9	381,51
30	10	523,33
25	12	904,32
20	14	1436,02
15	16	2143,57
10	18	3052,08
5	20	4186,66



Рис. 1. Диаграмма для визуального определения округлости частиц

Рассмотрим информационно-измерительную систему, которая позволяет зафиксировать присутствие в составе нефти твердых примесей и оценить их геометрические параметры.

Структурная схема системы (рис. 3) состоит из матрицы, содержащей электроакустические преобразователи (например, в количестве 26) [3], контроллера КНТ (содержащего ряд вспомогательных элементов – таймер, пороговые элементы, ключи, блок обработки информации [2]), коммутатора К, генератора импульсов ГИ, средства отображения информации СОИ.

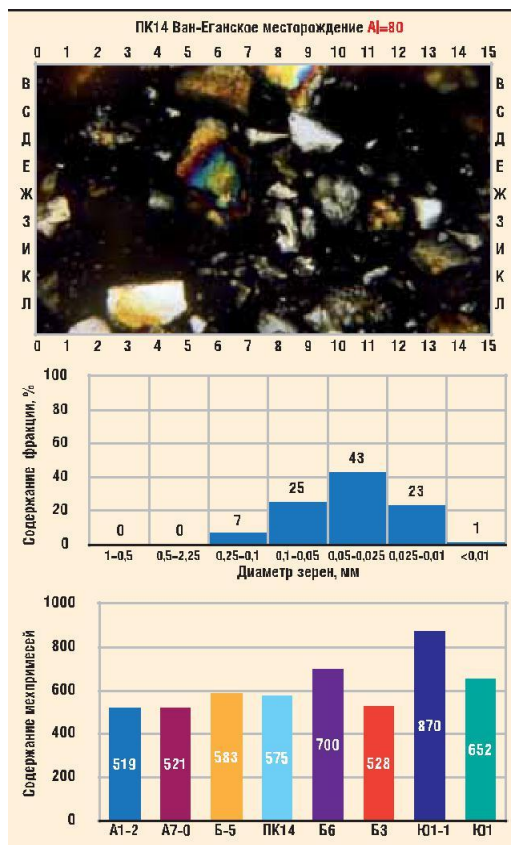


Рис. 2. Диаграмма распределения сферических механических примесей

Принцип действия системы заключается в следующем. Контроллер КНТ подключает генератор импульсов ГИ через коммутатор к 1 элементу матрицы, переводя его в режим передачи акустического сигнала (АС) перпендикулярно оси трубы.

Время прохождения АС фиксируется контроллером. На приемной стороне сигнал фиксируется пьезоэлементом 1', далее сигнал поступает в контроллер. В контроллере происходит сравнение мощностей излучаемого и принимаемого сигнала. Уменьшенная мощность принятого сигнала будет свидетельствовать о нахождении в контролируемом объеме твердых включений.

Далее с помощью коммутатора происходит переключение следующей пары пьезоэлементов в режим передачи и приема АС. Определение количества твердых частиц осуществляется при переключении матрицы пьезоэлементов 1-1', 2-2', ..., 13-13'. Сечение жидкости, охватываемое ультразвуковыми лучами, –



дискретное, и за время переключения элементов с 1–1' на 2–2" (рис. 4) жидкость сместится на незначительное расстояние (примерно на 0,15 мм).

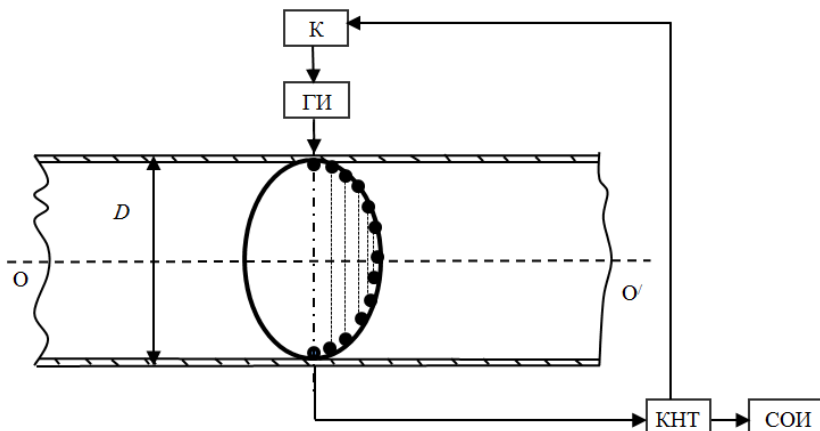


Рис. 3. Структурная схема информационно-измерительной системы с матрицей пьезоэлементов

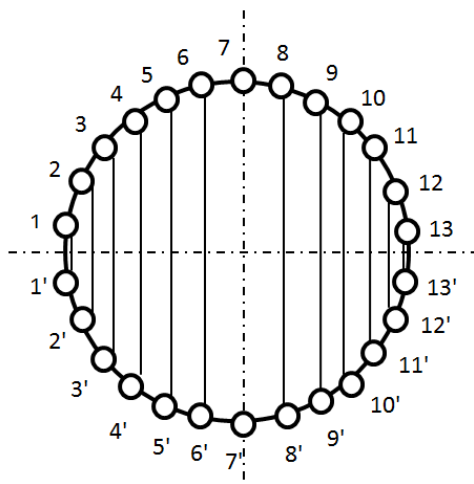


Рис. 4. Схема расположения пьезоэлементов в сечении трубопровода

Поскольку в составе нефти содержатся твердые частицы, то при их пересечении ультразвуковым лучом мощность акустического сигнала на приемном элементе уменьшается.

Суммарное значение объема  $N$  твердых сферических частиц диаметром  $d_i$  в потоке нефти определяется выражением

$$V_{\text{мв.ч}} = \frac{\pi}{6} \sum_{i=0}^N d_i^3 = \frac{\pi \cdot (d_1^3 + d_2^3 + \dots + d_n^3)}{6}. \quad (1)$$

Ультразвуковые колебания поступают на пьезоэлектрические преобразователи, располагаемые на участке трубопровода, в котором производится измерение твердых включений в нефти. Пьезоэлектрические преобразователи в паре рабо-

тают последовательно от 1-го до 13-го пьезоэлемента в режиме приемник/излучатель и обеспечивают излучение и прием ультразвуковых импульсов (от 1'-го до 13'-го пьезоэлемента) в нефти.

Объем чистой нефти, прошедшей за время  $t$  через сечение трубопровода, определяется выражением

$$V_{\text{чист.нефти}} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \nu t - \frac{\pi}{6} \sum_{i=0}^N d_i^3 = \frac{\pi D^2 l}{4} - \frac{\pi}{6} \sum_{i=0}^N d_i^3, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр трубопровода;

$\frac{\pi}{6} \sum_{i=0}^N d_i^3$  – суммарный объем сферических частиц;

$t$  – время, за которое определяется прошедший объем;

$\nu$  – скорость нефти;

$l$  – длина участка трубопровода.

Амплитуда приемного акустического сигнала зависит от размера твердой частицы. Затухание сигнала будет иметь место в том случае, если диаметр частицы соизмерим с длиной волны акустического сигнала или превышает ее.

Амплитуда принятого сигнала при встрече с частицей определяется выражением [4]

$$P' = \frac{P_0}{S_a} \int_{S_b} \kappa I^2 dS_b, \quad (3)$$

где  $P_0$  – амплитуда сигнала, излучаемого преобразователем;

$S_a$  – площадь элемента матрицы;

$S_b$  – площадь частицы;

$\kappa$  – коэффициент отражения сигнала;

$I$  – интенсивность сигнала.

Диаграмма отношения сигналов приемного и передающего тракта  $I = \frac{U_x}{U_{\text{max}}}$ , полученная при моделировании рабочего процесса, представлена на рис. 5.

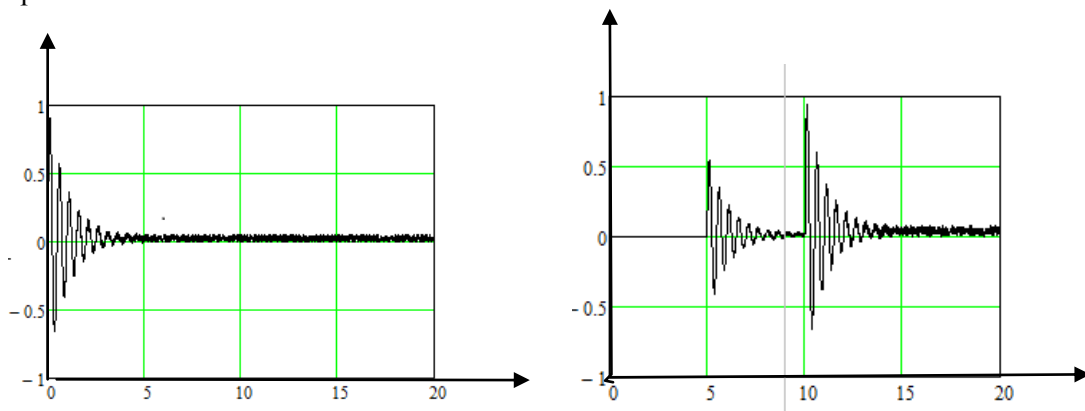


Рис. 5. Осциллограмма акустического сигнала при встрече с одной (а) и несколькими (б) частицами

Осциллограммы акустического сигнала в нефтяном потоке при его встрече с одной или несколькими частицами представлены в [8].

Интенсивность акустического сигнала при встрече ультразвукового луча с частицей в потоке нефти находится из выражения [4]

$$\left| \frac{P'}{P_0} \right| = \frac{\lambda^2}{S_a} |I^2| A_c, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны;

$A_c = \frac{S_b}{\lambda^2}$  – коэффициент, характеризующий отражение сигнала от сферических частиц;

$I = \frac{S_a}{\lambda x}$  – коэффициент, характеризующий задержку принимаемого сигнала;

$x$  – расстояние от акустического элемента матрицы до частицы;

$S_b = \frac{\pi d^2}{4}$  – площадь частицы;

$d$  – диаметр твердых частиц.

Таким образом, зависимость изменения амплитуды акустического сигнала от длины волны и от размера сферической частицы выражается формулой

$$\left| \frac{P'}{P_0} \right| = \frac{S_a \pi d^2}{4 \lambda^2 x^2}. \quad (5)$$

Длина волны определяется выражением

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (6)$$

где  $c$  – скорость ультразвука в жидкости, равная 1500 м/с;  $f$  – частота колебаний, например равная  $7,5 \cdot 10^4$  Гц.

При диаметре излучателя 7 мм его площадь  $S_a \sim 40 \text{ мм}^2$ ,  $\lambda = 2 \text{ мм}$ ,  $x = 200 \text{ мм}$ ,  $d = 2 \text{ мм}$ ; имеем

$$\left| \frac{P'}{P_0} \right| = \frac{S_a \pi d^2}{4 \lambda^2 x^2} \approx 0,00078.$$

Зависимость изменения затухания АС от диаметра частицы представлена в выражении (5). Ряд численных значений этого параметра для диаметров частиц в пределах 2...20 мм и отдаленности частиц от излучателя 200...500 мм представлен в табл. 2.

С использованием полученных значений можно построить графики (рис. 6, рис. 7), из которых видно, что чем крупнее частица и чем дальше она находится от излучателя, тем в большей степени происходит затухание сигнала.

В составе транспортируемой нефти присутствуют различные компоненты примесей (глина, парафин, песок) [6]. Согласно данным лабораторных исследований [7], присутствующие компоненты в составе нефти находятся в разных соотношениях (табл. 2).

## Значения затухания сигналов

Затухание сигнала при расстоянии 500 мм от излучателя до частицы	Затухание сигнала при расстоянии 400 мм от излучателя до частицы	Затухание сигнала при расстоянии 300 мм от излучателя до частицы	Затухание сигнала при расстоянии 200 мм от излучателя до частицы	Диаметр частиц, мм
0,00012	0,00196	0,00034	0,00078	2
0,00028	0,00044	0,00078	0,00176	3
0,00050	0,00078	0,00139	0,00314	4
0,00078	0,00122	0,00128	0,00490	5
0,00113	0,00176	0,00314	0,00706	6
0,00153	0,00240	0,00427	0,00961	7
0,00200	0,00314	0,00558	0,01256	8
0,00254	0,00397	0,00706	0,01589	9
0,00318	0,00497	0,00884	0,00199	10
0,00452	0,00706	0,01256	0,02826	12
0,00615	0,00961	0,01709	0,03846	14
0,00803	0,01256	0,02232	0,05024	16
0,01017	0,01589	0,02826	0,06358	18
0,01256	0,01962	0,03488	0,07858	20

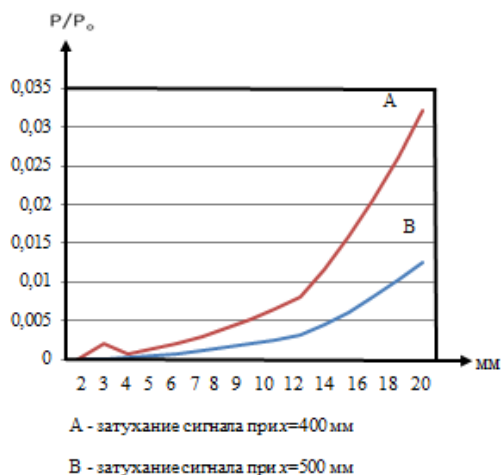


Рис. 6. Зависимость изменения (затухания) сигнала при расстоянии до частиц 400 и 500 мм

При обработке данных, представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что размер частиц в реальном нефтяном потоке лежит в пределах 2...20 мм. Таким образом, акустический сигнал при пересечении частицы в нефтяном потоке будет изменяться в диапазоне порядка 0...100 % от его максимального значения,

что и определяет динамический диапазон сигнала при его последующей обработке.

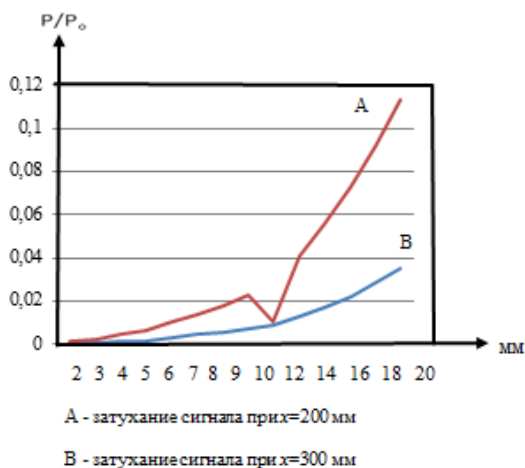


Рис. 7. Зависимость изменения (затухания) сигнала при расстоянии до частиц 200 и 300 мм

Следовательно, с помощью описанной системы можно зафиксировать твердые примеси, присутствующие в потоке нефти, транспортируемой по магистральным трубопроводам. Их размеры лежат в пределах 2...20 мм.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества вещества: Справочник № 2. – 5-е изд., перераб. и доп. – Спб.: Политехника, 2004. – 412 с.
2. *Шатхутдинов А.Ш. и др.* Автоматизированный учет нефти и нефтепродуктов при добыче, транспорте и переработке. – М.: Недра, 2002. – 417 с.
3. *Паутова А.С.* Информационно-измерительная система объемного расхода нефти с учетом содержания твердых примесей // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 4 (17). – С. 1–5. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/52tvn413.pdf>.
4. *Голямина И.П.* Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
5. *Хаисуваров К.И.* Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учеб. пособие. – М: Изд-во стандартов, 1990. – 287 с.
6. ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – М.: Стандартиформ, 2007. – 7 с.
7. *Лаврентьев А.В., Афанасьев А.В.* Анализ причин и последствий пескопроявлений на завершающей стадии разработки нефтяных и газовых месторождений // Научно-технический журнал № 4. – М.: Горная книга, 2015. – 32 с.
8. *Саиткулов Н.О.* Ультразвуковой способ измерения содержания нефти и твердых взвешенных частиц в сточной воде // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2010. – № 4. – С. 78–81.

Статья поступила в редакцию 16 января 2018 г.

## DETERMINATION OF QUANTITIES AND SIZES OF SOLID PARTICLES IN THE OIL FLOW ON THE BASIS OF ULTRASOUND METHOD

*P.K. Lange, A.S. Pautova*

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

**Abstract.** *We consider an ultrasonic system that records the presence of impurity particles in an oil flow and estimates their dimensions. The structure of a measuring system containing a matrix of emitting and receiving piezo elements forming a set of ultrasonic beams scanning the entire cross section of an oil pipeline is described. Experimental data on the parameters of solid particles in the oil flow are presented, an ultrasonic method for determining these parameters is proposed. Parameters of particles in the oil flow recorded by the described system are estimated. The ultrasonic signal model in the system under consideration is determined, the possibility of determining the size and amount of solid particles of minerals, as well as paraffins in the oil flow in the oil pipeline, is shown. An approximation model of the ultrasonic signal in the measuring system is proposed, the possibility of using such a system in the oil industry is determined.*

**Keywords:** *model of signal, ultrasonic method, electroacoustic transducers, matrix of piezoelements, section scanning, solid particles.*

---

*Petr K. Lange (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Anna S. Pautova, Postgraduate Student.*