

## Определение степени заполнения шаровой мельницы на основе измерения виброускорения поверхности ее барабана

*Д.А. Полещенко, Д.И. Соколов*

*Старооскольский технологический институт им. А.А.Угарова (филиал) НИТУ  
“МИСИС”, Россия, г. Старый Оскол*

**Аннотация:** В работе приведены аспекты разработки устройства для беспроводного съема сигнала виброускорения с поверхности барабана шаровой мельницы. Приведены результаты измерения виброускорения для макета шаровой мельницы на различных уровнях загрузки измельчаемым материалом. Согласно данным результатам, с увеличением загрузки измельчаемыми материалами шаровой уровень вибрации понижается. Также в работе приведены полученные круговые диаграммы распределения вибрационной нагрузки по барабану мельницы, по которым можно судить о ее текущем режиме функционирования.

**Ключевые слова:** шаровая мельница, беспроводной съем сигнала, виброускорение, контроль загрузки мельницы.

В процессах обогащения железных руд широко применяются барабанные шаровые мельницы для их измельчения. Дробящей средой в них являются твердые мелющие шары, которые при вращении мельницы поднимаются на определенную высоту и измельчают руду за счет трения и ударов при падении. Основным элементом мельницы является вращающийся барабан цилиндрической формы, частично заполненный чугунами или стальными шарами. Скорость подачи исходной руды в мельницы задается технологическим персоналом в зависимости от типа перерабатываемой руды. Из-за колебаний свойств исходной руды возможен перегруз мельницы, в результате чего её вынуждены останавливать для разгрузки. В то же время, при недостаточной степени загрузки руды, снижается эффективность работы шаровой мельницы. Таким образом, контроль и управление уровнем заполнения мельницы является важной и весьма сложной с точки зрения технической реализации задачей [1].

Существуют различные способы определения степени загрузки мельниц: виброакустический анализатор шума (звука) мельницы ВАЗМ [2], радиоизотопный анализатор заполнения РИЗМ [3], анализ сигнала активной

---

мощности [4], потребляемой синхронным двигателем мельницы, анализ сигнала виброускорения подшипников на цапфе мельницы [5], анализ момента на валу мельницы [6]. Во всех этих методах используется косвенное измерение требуемого параметра.

Наиболее перспективным и эффективным из существующих подходов представляется метод, основанный на измерении виброускорения на цапфах мельниц. Именно он чаще всего применяется на производстве и дает наибольший объем достоверной информации.

Однако практические эксперименты, описанные в работах [7-8], показывают значительное влияние рабочего процесса соседних агрегатов на характер измеряемого сигнала вибрации, которое создает существенные искажения сигнала, практически не поддающиеся анализу. Сигнал виброускорения поверхности барабана мельницы по мнению авторов работы [9] является наиболее помехозащищенным.

В данной работе для определения степени заполнения шаровой мельницы было разработано устройство, которое может устанавливаться на барабане мельницы и по беспроводному интерфейсу передавать данные с датчика виброускорения. Также в работе были разработаны алгоритмы обработки полученного сигнала с возможностью построения круговых диаграмм распределения рудно-шаровой нагрузки внутри мельницы для определения её режима работы.

При разработке устройства исходили из необходимости обеспечить:

1. Низкое энергопотребление
  2. Защиту от внешних шумов
  3. Высокую скорость и/или дальность передачи данных
  4. Низкую стоимость компонентов и их доступность в условиях санкций.
-

Для измерения уровня вибрации был выбран вибропреобразователь AP2037, характеризующийся высокой устойчивостью к внешним электромагнитным полям, наличием встроенного предусилителя и широкого диапазона частоты измерения.

Согласно технической документации датчика полезная составляющая сигнала находится в диапазоне от -5 до +5 В. Для данного сигнала был произведен подбор внешнего дифференциального АЦП, который сможет обеспечить высокую точность, низкое энергопотребление и относительно высокую частоту снятия сигнала с датчика. Для этого было выбрано АЦП ADS1015, которое удовлетворяет заданным требованиям, потребляя в бесперебойном режиме работы 0.6 мВт, частотой измерения до 3.3кГц. Так как напряжение питания датчика находится в диапазоне от 15 до 30 В, был использован DC/DC преобразователь с 3.3 до 24 В. Также был рассчитан и установлен фильтр высоких частот для устранения помех с повышающего преобразователя [10]. На самой плате было разведено экранирование для защиты от внешних наводок. Чтобы полностью исключить влияние помех на прибор от модулей передачи данных, было реализовано разделение питания АЦП с помощью DC/DC преобразователя с гальванической развязкой. Далее для снятия сигнала с АЦП по протоколу I2C был установлен микроконтроллер. Он снимает данные с АЦП и передает их на модуль передачи данных (см. рис 1).

Для определения скорости вращения мельницы и положения датчика виброускорения на мельнице был установлен энкодер. Он состоит из контроллера, модуля передачи данных и инфракрасного датчика отражения.

В месте крепления датчика виброускорения установлена светоотражающая метка. Когда датчик приема отраженного сигнала, установленный на вершине мельницы, фиксирует метку, он отправляет на приемник данные о времени прохождения через метку. Сигнал о том, в какой

---

момент датчик виброускорения находился на верхней части мельницы, позволяет определять точку начала построения круговой диаграммы и скорость вращения мельницы.

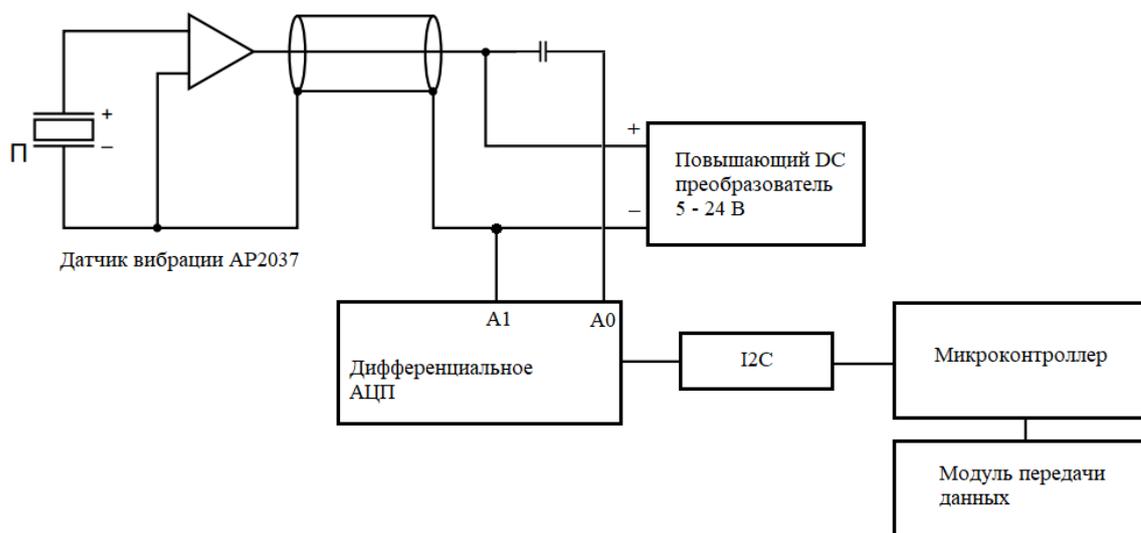


Рис. 1. Структурная схема устройства

Создано устройство, которое может устанавливаться на барабане мельницы и в процессе эксплуатации передавать данные по технологии Wi-fi (см. рис 2) на приемник данных (см. рис 3), подключенный к компьютеру по USB-интерфейсу.

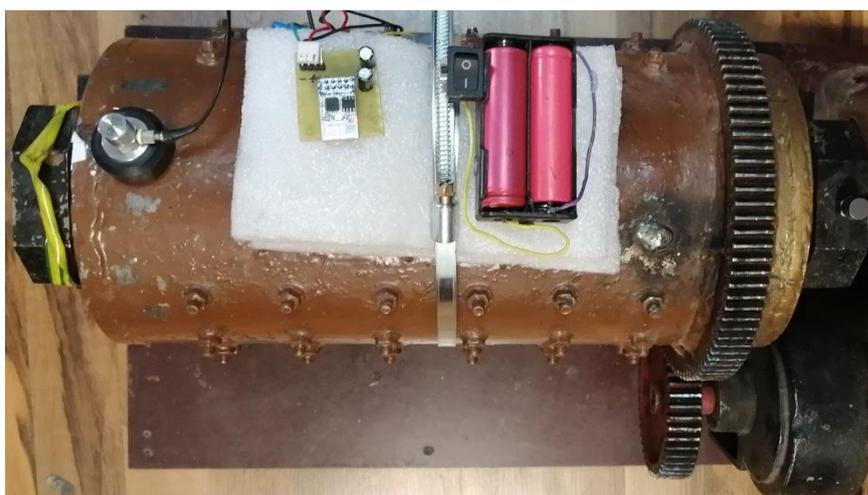


Рис. 2. Место установки датчика и прибора на макете шаровой мельницы



Рис. 3. Приемник сигнала

Для записи данных на диск и первичного анализа было написано специализированное ПО на языке C#. Основной интерфейс приложения представлен на рис. 4.

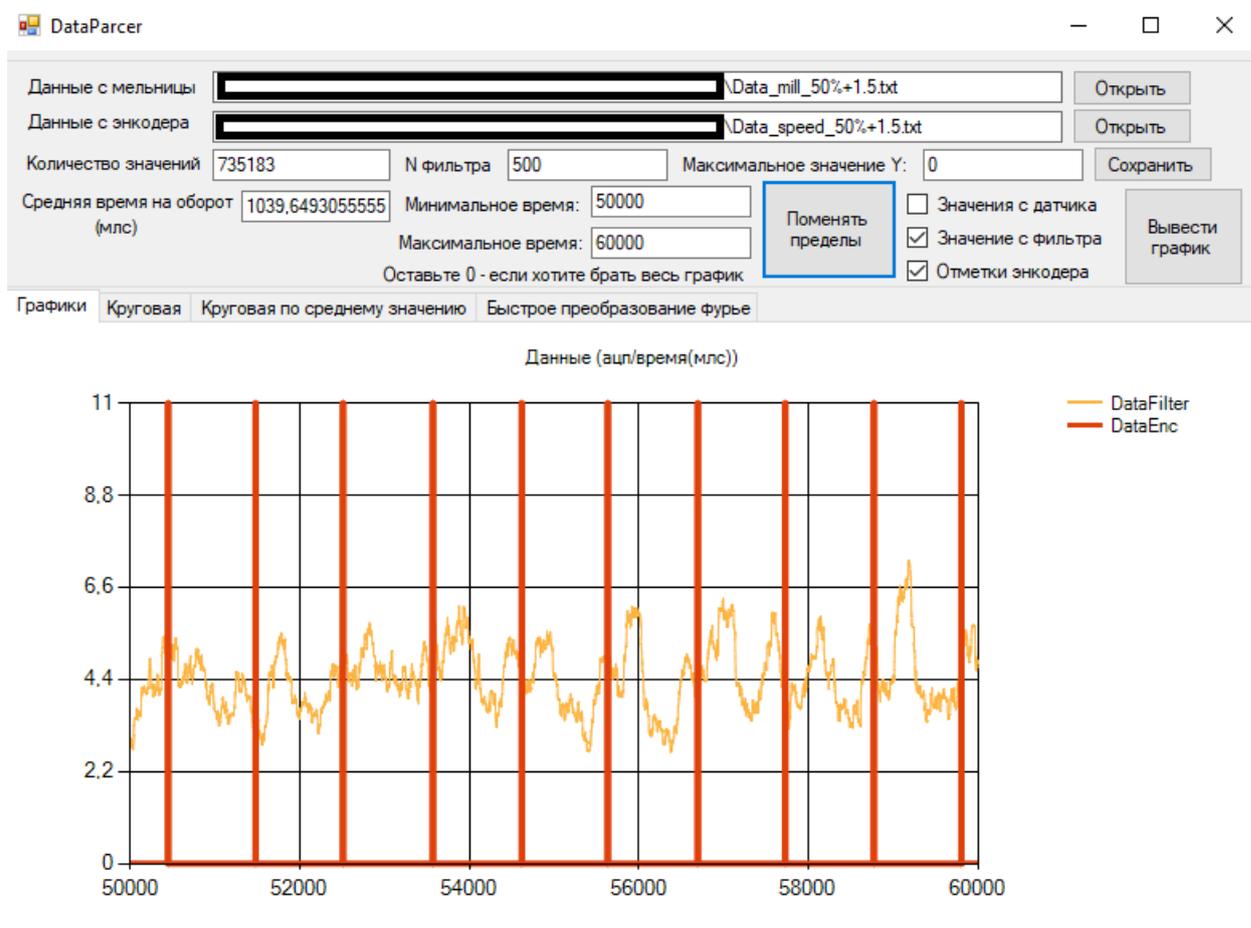


Рис. 4. Вид программы для анализа данных

Созданное устройство было установлено на действующую модель мельницы и на ней были проведены следующие эксперименты:

- в барабан было загружено 8 кг шаров, что составляет порядка 50% её заполнения, что соответствует режиму работы реальной мельницы [11];
- к шаровой нагрузке в барабан мельницы было последовательно загружено по 0.5 кг материала для измельчения.

В результате съёма сигнала виброускорения были получены сигналы, представленные на рис. 5

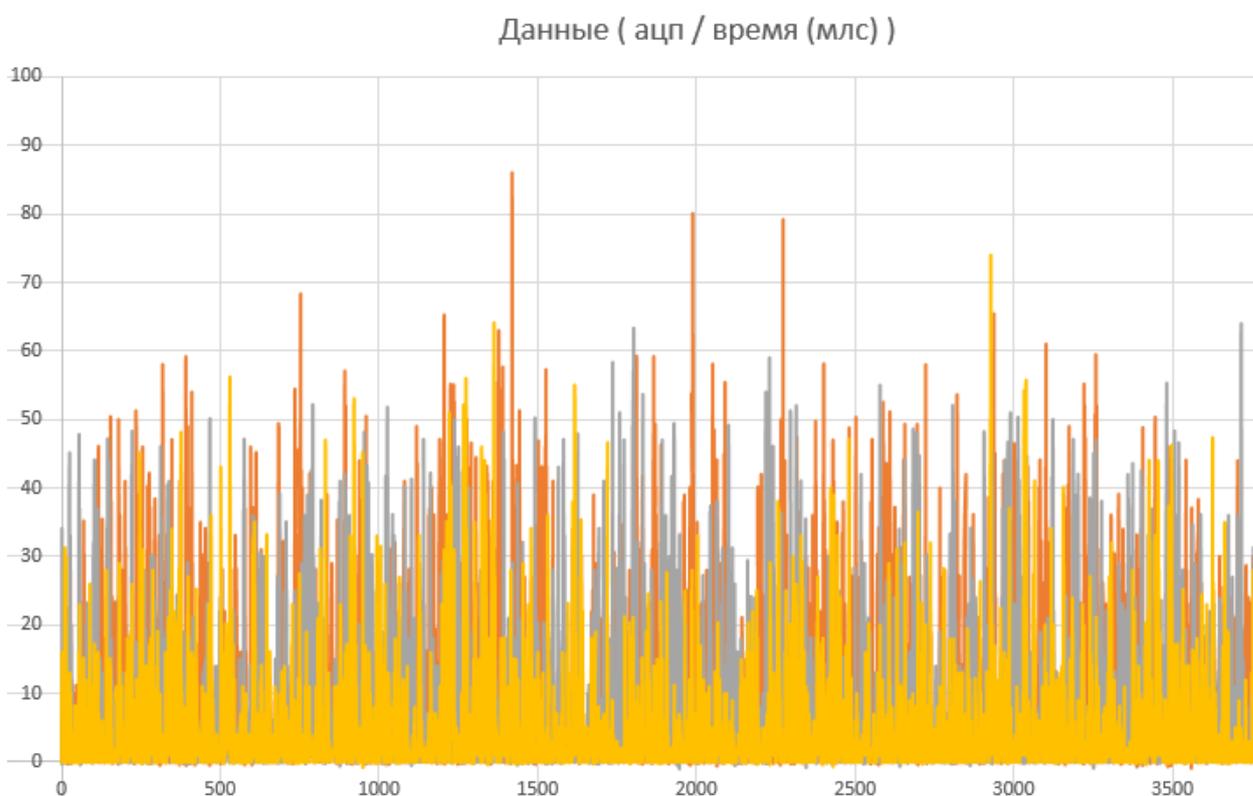


Рис. 5. Результаты снятия сигнала с вибропреобразователя с различной степенью заполнения шаровой мельницы, где оранжевый – 50% заполнения шарами + 0.5 кг материала для измельчения, серый – 50% заполнения шарами + 1 кг материала для измельчения, желтый – 50% заполнения шарами + 1.5 кг материала для измельчения.

На общем уровне сигнала видно, что с увеличением нагрузки шаровой мельницы уменьшается общий уровень сигнала вибрации.

С помощью разработанного программного обеспечения данные были обработаны с помощью фильтра скользящего среднего (см. рис. 6):

$$\hat{y}_t = \frac{1}{p} \sum_{j=t-m}^{t+m} y_j$$

где  $y$  – входной сигнал,  $p$  – количество элементов,  $m$  – размер окна равный 2680 измерений виброускорения.

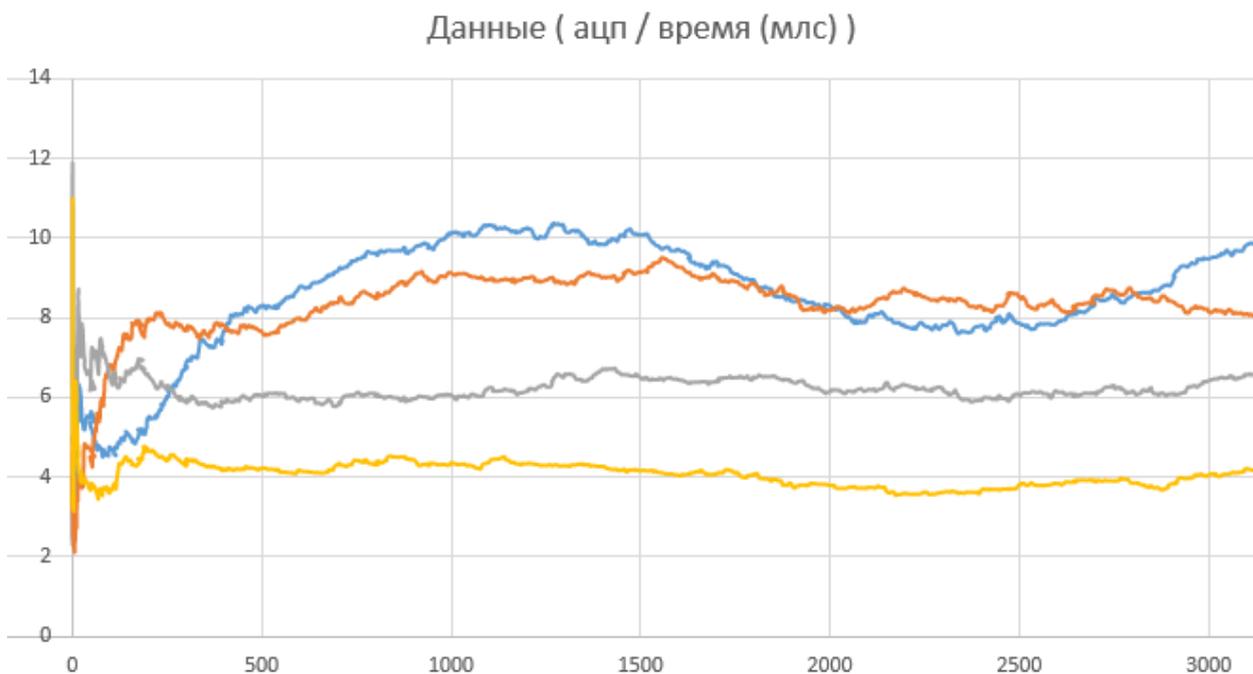


Рис. 6 Обработанный сигнал с вибропреобразователя, где синий – 50% заполнения шарами, оранжевый – 50% заполнения шарами + 0.5 кг материала для измельчения, серый – 50% заполнения шарами + 1 кг материала для измельчения, желтый – 50% заполнения шарами + 1.5 кг материала для измельчения.

По результатам опытов видно, что с увеличением загрузки шаровой мельницы средний уровень амплитуды сигнала стал более равномерным. Четко видна корреляция между уровнем загрузки мельницы измельчаемым материалом и амплитудой сигнала виброускорения ее поверхности. Максимальная вибрация создается при заполнении барабана только шарами, а далее по мере загрузки вибрация падает.

Были построены круговые диаграммы среднего значения уровня распределения вибрационной нагрузки (см. рис. 7)

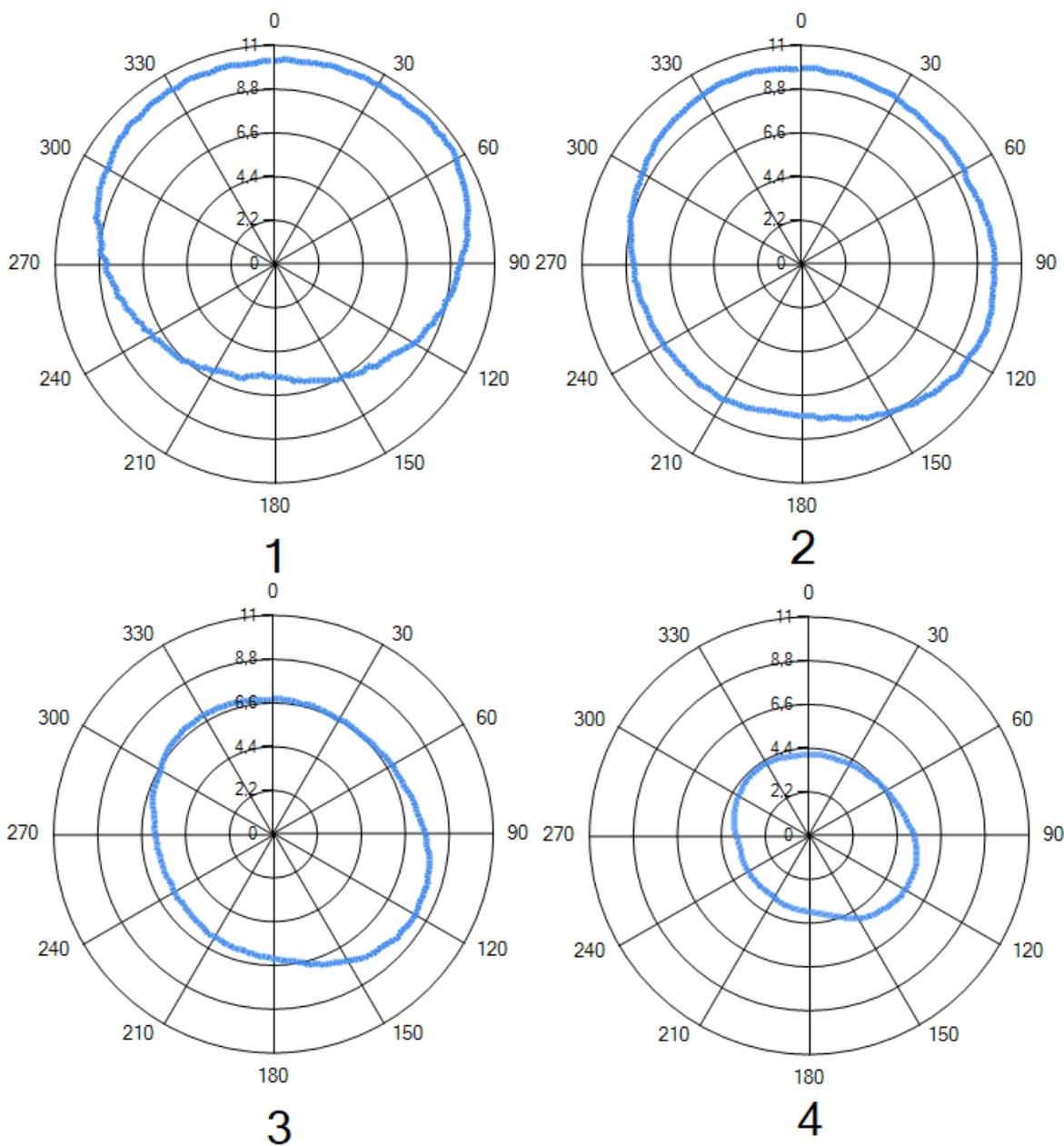


Рис.7 Круговые диаграммы среднего значения уровня распределения вибрационной нагрузки, где 1- 50% заполнения шарами, 2 – 50% заполнения шарами + 0.5 кг материала для измельчения, 3 – 50% заполнения шарами + 1 кг материала для измельчения, 4- 50% заполнения шарами + 1.5 кг материала для измельчения

На построенных диаграммах радиус показывает средний уровень сигнала вибрации, а по окружности от 0 до 360 градусов показано положение датчика на поверхности мельниц. Точка нуля установлена на верхней точке мельницы с вращением по часовой стрелке.

Аналогичный характер изменения виброускорения наблюдается и на круговых диаграммах. На диаграммах видно, что с увеличением загрузки шаровой мельницы позиция максимального уровня сигнала вибрации смещается от района 90 в район 150 градусов вала шаровой мельницы, что характерно для ее нормального режима эксплуатации – водопадного режима.

Результаты проведенных экспериментов показали, что разработанное устройство можно успешно использовать для определения степени заполнения шаровой мельницы, а разработанное ПО позволит контролировать распределение нагрузки внутри барабана и в дальнейшем управлять режимом работы мельницы.

### Литература

1. Полещенко Д.А., Боровинских М.Д., Повышение эффективности работы шаровой мельницы путем совместного использования наблюдателя состояний и экстремального регулятора // Инженерный вестник Дона, 2022, №11. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7964/.

2. Улитенко К.Я., Маркин Р.П., Соколов И.В. Виброакустический анализ процессов дробления и измельчения на горно-обогатительных предприятиях // Горный журнал. 2009. №10. С. 72-76.

3. Гейзенблазен Б.Е., Л.Т. Лорман, М.Н. Левченко Разработка и исследования радиоизотопного измерителя заполнения мельниц мокрого самоизмельчения // Обогащения руд. 1978. №2. С. 38-41.

4. Тараненко М.Е. Разработка системы управления загрузкой мельницы вывода гали и скрапа обогатительной фабрики АО «Лебединский ГОК» на

основе контроля вибрации подшипниковых узлов // Инженерный вестник Дона. 2023. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8328](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8328).

5. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., Пожарский Ю.М. О возможности определения уровня загрузки шаровой мельницы в результате нейросетевого анализа спектра сигнала виброускорения ее цапфы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. №216. С. 38-47.

6. Жуковский Ю.Л., Королев Н.А. Н., Малькова Я.М. Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки горного института. 2022. №256. С. 686-700.

7. Полещенко Д.А. Опыт промышленной эксплуатации автоматизированной системы мониторинга уровня заполнения шаровой мельницы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. №12. С. 153-160.

8. Пожарский Ю.М., Полещенко Д.А., Подковыров И.Ю. Определение степени заполнения мельницы мокрого самоизмельчения с применением беспроводных технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №2. С. 38-47.

9. K. Gugel, G. Palacios, J. Ramirez, & M. Parra Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing (DSP) technology // Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003. – IEEE, 2003. – С. 311-318. Poleshchenko D.A.

10. Синютин Е.С., Беляев А.О. Формирование структуры интегрального входного аналогового тракта для интеллектуального датчика вибрации // Инженерный вестник Дона. 2015. №2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3057>

11. Амосов Е. А. Модель определения оптимального заполнения шаровой мельницы // Современные материалы, техника и технологии. 2020. №4. С. 4-9.



## References

1. Poleshhenko D.A., Borovinskix M.D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7964/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/7964/).
2. Ulitenko K.Ya., Markin R.P., Sokolov I.V. Gornyj zhurnal. 2009. №10. pp. 72-76.
3. Gejzenblazen B.E., L.T. Lorman, M.N. Levchenko Obogashheniya rud. 1978. №2. pp. 38-41.
4. Taranenko M.E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8328](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8328).
5. Eremenko Yu.I., Poleshhenko D.A., Glushhenko A.I., Pozharskij Yu.M. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten`. 2016. №216. pp. 38-47.
6. Zhukovskij Yu.L., Korolev N.A. N., Mal`kova Ya. M. Zapiski gornogo instituta. 2022. №256. pp. 686-700.
7. Poleshhenko D.A. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten`. 2017. №12. pp. 153-160.
8. Pozharskij Yu.M., Poleshhenko D.A., Podkovy`rov I.Yu. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten`. 2013. №2. pp. 38-47.
9. K. Gugel, G. Palacios, J. Ramirez, & M. Cement Industry Technical Conference, 2003. Conference Record. IEEE-IAS/PCA 2003. IEEE, 2003. pp. 311-318. Poleshchenko D.A.
10. Sinyutin E.S., Belyaev A.O. Inzhenernyj vestnik Dona. 2015. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3057](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3057)
11. Amosov E. A. Sovremennye materialy`, texnika i texnologii. 2020. №4. pp. 4-9.

**Дата поступления: 20.10.2023**

**Дата публикации: 15.12.2023**