УДК 004.042, 622.73

Д.А. Полещенко

ОПЫТ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ*

Рассмотрен процесс создания автоматизированной системы мониторинга уровня заполнения шаровой мельницы. Для съема информации и косвенной оценки состояния мельницы использовались акселерометры, установленные на обе цапфы мельницы. Для сбора и обработки данных была реализована система с применением оборудования и программного обеспечения компании National Instruments. Эксперименты проводились в технологическом процессе измельчения руды на шаровой мельнице ОАО «Стойленский ГОК». Для оценки сигнала виброускорения цапф мельницы разработан специальный критерий, который показал свою состоятельность в плане высокой корреляции с параметрами технологического процесса. Определен наиболее информативный частотный диапазон, характеризующий состояние мельницы. Его полоса пропускания составляет 1950–200 Гц. В качестве критериев эффективности выступали быстрота и наличие реакции на внешние возмущения, проявляющиеся в разработанном критерии и сигналах тока спиралей классификатора, как основного показателя заполнения барабана мельницы для оператора. Предлагаемая система мониторинга позволила более быстро и с большей чувствительностью диагностировать изменения внутримельничного заполнения относительно текущей оценки проводимой оператором мельницы.

Ключевые слова: степень заполнения мельницы, акселерометр, спектральный анализ, спектр, шаровая мельница, виброускорение.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-153-160

На сегодняшний день на горно-обогатительных предприятиях при переработке рудного материала в шаровых мельницах операторы испытывают определенные трудности при управлении данными агрегатами [1]. Суть проблемы заключается в том, что оптимальный по удельному расходу энергоресурсов режим работы объекта состоит в максимально возможной загрузке барабана мельницы рудным материалом [2]. В свою очередь, данный режим характеризуется тем, что объект при подаче в мельницу излишнего объема руды может перейти в состояние перегруза, которое сопровождается выносом из мельницы крупной (неизмельченной гали), шаров и приводит к необходимости аварийной остановки объекта. Как следствие, простой мельницы до устранения последствий перегруза ведет к существенным экономическим потерям предприятия. Чтобы избежать подобного негативного явления оператор мельницы вынужден работать в режиме

* Исследование проведено при финансовой поддержке прикладных научных исследований Министерством образования и науки Российской Федерации, договор № 14.575.21.0133 (RFMEFI57517X0133).

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 12. С. 153–160.
© Д.А. Полещенко. 2017.

недогруза, который может составлять 5—15% [3]. При большой энергоемкости привода мельницы (3—4 МВт) повышение производительности даже на 1% может принести существенную экономическую прибыль предприятию.

Невозможность оптимально управлять мельницей является следствием отсутствия метода измерения, способного точно определять уровень заполнения мельницы.

В горнорудной промышленности известен способ измерения степени загрузки мельницы на основании анализа сигнала активной мощности [4], потребляемой синхронным двигателем мельницы. На практике данный способ дает весьма противоречивые результаты. Расход энергии связан со степенью заполнения мельницы дробящейся средой. С ростом степени заполнения мельницы дробящейся средой растет расход энергии на измельчение и достигает максимума при определенной степени заполнения. Но при дальнейшем увеличении степени заполнения мельницы расход энергии уменьшается, что не позволяет нам судить о дальнейшей загрузке мельницы.

В работе [5] предлагается применение гидравлического метода измерения, основанного на измерении давления масла в централизованной системе маслосмазки шаровой мельницы. Утверждается, что данный подход позволит эффективно контролировать уровень ее загрузки, если удастся в системах питательного и разгрузочного подшипников цапф мельницы обеспечить стабилизацию расхода масла, а также предусмотреть компенсацию возмущающих воздействий в их работе с учетом нагрева или охлаждения масла в различные периоды года. Однако на практике как раз данные факторы существенно влияют на уровень помех в измерении давления масла в системе гидроподпора и делают практически невозможным добиться высокой корреляции давления с уровнем заполнения шаровой мельницы.

Существует промышленный прибор ВАЗМ-1 [6], в основе работы которого лежит совместный анализ сигналов звука, исходящего от вращающегося барабана мельницы и вибрации ее цапф. Однако для управления загрузкой данное устройство не используется, так как его показания не обеспечивают требуемую точность, необходимую для целей управления, а показывают лишь направление изменения объема рудной массы в барабане мельницы. Это происходит вследствие того, что процесс помола руды достаточно сложен и многофакторен.

На состояние спектра оказывают влияние различные факторы в том числе значительную погрешность вносит шум от работающих соседних мельниц [7]. Поэтому спектр звука и, соответственно, агрегированный показатель уровня загрузки изменяется, что требует перенастройки параметров ВАЗМа.

Настройка данного устройства является достаточно трудоемким процессом, можно даже сказать «научно-исследовательским», так как нужно определить наиболее информативные диапазоны частот по полученным спектрограммам и для этих диапазонов подобрать коэффициенты масштабирования, которые бы обеспечивали агрегированный выходной сигнал, характеризующий загрузку барабана. В реалиях производства подбором оптимальных параметров устройства не занимаются и работают на исходных настройках.

Аналогичный способ обработки информации предлагается в работе [8] с той лишь разницей, что анализируется только сигнал виброускорения барабана мельницы. Так же в работе предлагается алгоритм оптимизации для подбора весовых коэффициентов для соответствующих спектральных областей. Однако, как отмечают сами авторы, данный

подход пока не способен установить нелинейную связь между гармониками спектра сигнала виброускорения и характеристиками мельницы.

В работах [9, 10] так же рассматривается спектр сигнала виброускорения, предлагая для анализа использовать нейронные сети прямого распространения. Однако конкретизации параметров сети и алгоритмов обработки информации (формирование обучающей выборки, алгоритм обучения) в работе не приводятся. Объектом исследований в данных работах является шаровая мельница по измельчению цемента.

Оператор мельницы, исходя из своего опыта, при оценке уровня ее заполнения (предперегрузочное состояние) ориентируется на группу показателей, среди которых можно выделить основной — токи спиралей классификатора, и вспомогательные — расход руды в мельницу, расход воды в мельницу и бутару мельницы. На основании динамики изменения указанных параметров он принимает решение о возможных действиях по их варьированию с целью недопущения перегруза мельницы.

Целью данной работы является поиск эффективного метода оценки уровня заполнения мельницы в результате анализа сигнала виброускорения цапфы мельницы.

Исследования проводились на шаровой мельнице ОАО «Стойленский ГОК». В качестве датчиков измерения сигнала виброускорения использовались вибропреобразователи общего назначения AP 2037 с осевой чувствительностью 100 мВ/g, 500 мВ/g и частотным диапазоном 0,5...15 000 Гц. Данные датчики были установлены на загрузочной и разгрузочной цапфах мельницы. Причем на разгрузочной цапфе были установлены 2-а датчика с разной чувствительностью (рис. 1, *а*). Сигнал с датчиков AP 2037 поступал на 4 — канальный, 24 — разрядный модуль аналогового ввода NI 9234, имеющий четыре BNC коннектора для подключения четырех каналов аналогового ввода с одновременной оцифровкой сигналов (рис. 1, *б*). Данный модуль устанавливается в специальное шасси National Instruments cDAQ-9181, подключаемое к ПК при помощи Ethernet интерфейса. Для обработки сигналов было создано программное обеспечение в среде NI LabVIEW 2013.

Анализ снятых сигналов виброускорения показал, что производить оценку степени заполнения барабана только по амплитуде сигнала невозможно. Для получения необходимых результатов и выявления закономерностей был проведен спектральный анализ полученных сигналов [11, 12].

а) б)

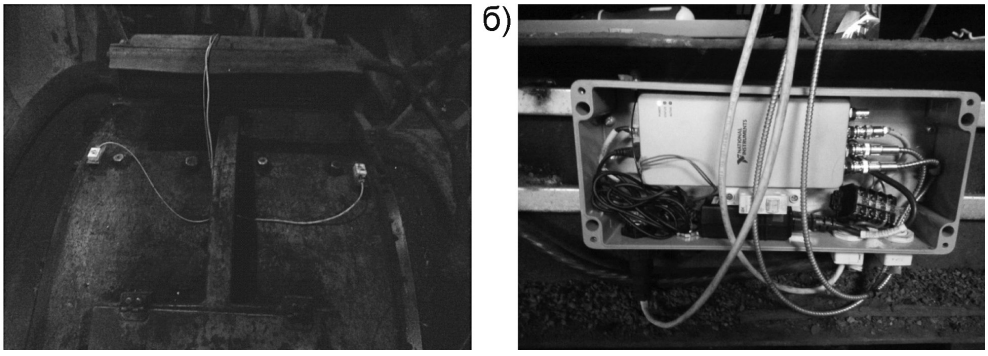

Рис. 1. Установленное на объекте оборудование: датчики на разгрузочной цапфе мельницы (а), бокс с оборудованием (б)

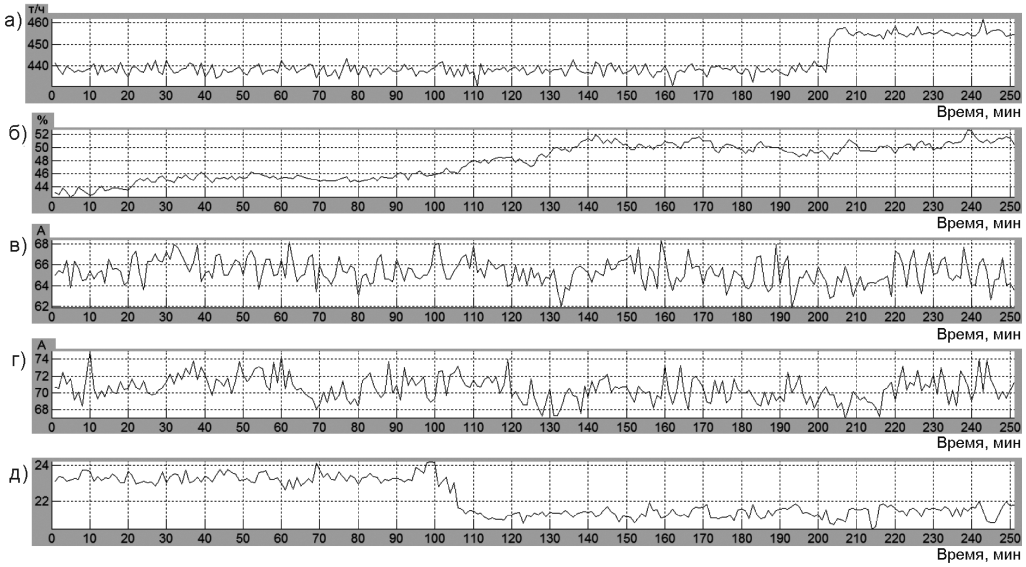

Рис. 2. Тренды системы контроля мельницы для ситуации 1: расход руды в мельницу (а), критерий J (б), ток 1-ой спирали (в), ток 2-ой спирали (г), коэффициент твердое/жидкое (д)

В проведенных экспериментах установлено, что информативная составляющая спектра сигнала виброускрения находится в диапазоне 0—4500 Гц. Поэтому съем сигнала осуществлялся с частотой 10 кГц на канал. Информация непрерывно записывалась в файл формата <name>.lvm. В работе для обработки сигнала был сформирован критерий (1), где f — частота гармонической составляющей сигнала виброускорения цапфы мельницы; Спектр виброускорения (f) — амплитуда гармоники на частоте f; F_1 — нижняя граница исследуемого частотно-

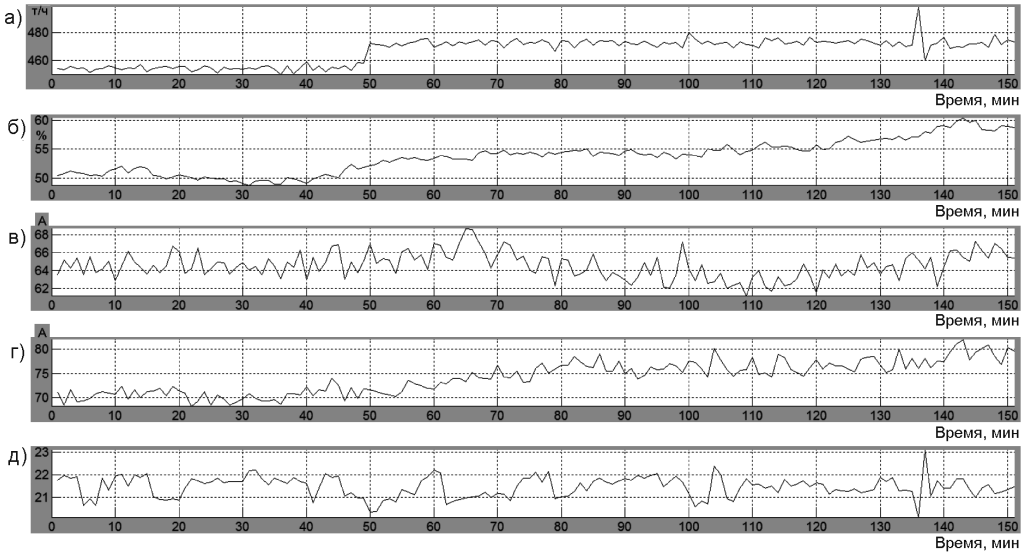

Рис. 3. Тренды системы контроля мельницы для ситуации 2: расход руды в мельницу (а), критерий J (б), ток 1-ой спирали (в), ток 2-ой спирали (г), коэффициент твердое/жидкое (д)

$$J = 100\% * \frac{\dfrac{1}{\int_{F_2}^{F_1} \text{Спектр виброускорения}(f) \cdot df}}{\max\left(\dfrac{1}{\int_{F_2}^{F_1} \text{Спектр виброускорения}(f) \cdot df}\right)} \quad (1)$$

го диапазона; F_2 — верхняя граница исследуемого частотного диапазона.

В работе исследовались различные частотные диапазоны из спектра сигнала виброускорения. Расчет критерия в динамике производился следующим образом: в виду реальной динамики мельницы равной 15—20 мин и в связи с дискретностью обновления информации на пульте оператора мельницы равной 1 мин было принято решение формировать архив данных в течение 1 мин с частотой съема 10 кГц, далее для данного объема данных вычислялся спектр, затем к полученному спектру применялась формула расчета критерия для заданного частотного диапазона. В результате чего получается одна точка на графике (рис. 2—4) в осях: ордината — критерий, %; абсцисса — время, мин.

Так как реальный уровень заполнения мельницы достоверно измерить невозможно, то для привязки расчетного критерия был произведен расчет автокорреляционной функции между критерием и сигналами технологического процесса. В результате анализа информации за два месяца нормального функционирования объекта, был определен частотный диапазон 1950—2200 Гц, имеющий максимальную корреляцию с сигналами технологического процесса.

С целью сравнительного анализа динамики изменения предлагаемого в работе критерия J с параметрами технологического процесса, на которые опирается оператор были проанализированы три участка, где интуитивно понятно изменение свойств технологического процесса: 1 — характеризуется уменьшением расхода воды и соответствующим изменением коэффициента твердое/жидкое; 2 — характеризуется изменением расхода руды в мельницу с 455 т/ч до 475 т/ч; 3 — характеризуется снижением расхода руды в мельницу с 460 т/ч до 0 т/ч и затем, через 4 минуты, повышением до 490 т/ч.

Если более детально рассматривать ситуацию 1, графики переходных процессов для которой приведены на рис. 2 в увеличенном масштабе, то можно увидеть, что после 200 мин изменяется коэффициент твердое/жидкое (рис. 2, *д*), т.е. в мельницу начинает подаваться меньше воды, что приводит к повышению уровня заполнения мельницы, так как вода является основой транспортировки руды внутри мельницы. Данное обстоятельство четко прослеживается на графике сформированного критерия (рис. 2, *б*) и отсутствует на графиках тока спиралей классификатора (рис. 2, *г, в*).

Если рассмотреть ситуацию 2, графики переходных процессов для которой приведены на рис. 3 в увеличенном масштабе, то можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки около 50-ой минуты реакция на него критерия J более быстрая — переходный процесс завершается за 5—10 мин, в отличие от переходных процессов тока спиралей класси-

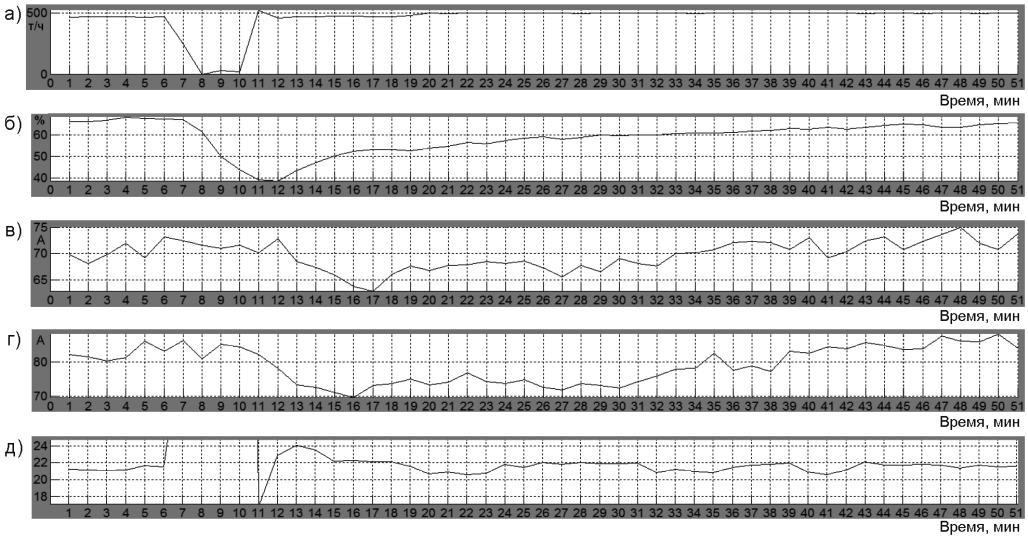

Рис. 4. Тренды системы контроля мельницы для ситуации 3: расход руды в мельницу (а), критерий J (б), ток 1-ой спирали (в), ток 2-ой спирали (г), коэффициент твердое/жидкое (д)

фикатора, один из которых не реагирует на изменение нагрузки (рис. 3, *в*), а динамика второго составляет 15—20 мин (рис. 3, *г*).

Если рассмотреть ситуацию 3, графики переходных процессов для которой приведены на рис. 4 в увеличенном масштабе, то можно сделать вывод, что при снижении расхода руды на 6 мин (рис. 4, *а*) расчетный критерий начинает снижаться в момент времени 7 (рис. 4, *б*), а токи — один на 12 мин (рис. 4, *в*), второй на 11 мин (рис. 4, *г*).

При увеличении расхода руды на 10 мин расчетный критерий начинает увеличиваться в момент времени 12 (рис. 4, *б*), а токи — один на 17 мин (рис. 4, *в*), второй на 16 мин (рис. 4, *г*). Также следует отметить большую чувствительность метода: при изменении расхода руды с 460 т/ч до 0 т/ч расчетный критерий изменяется с 67% до 38,5%, первый ток спирали классификатора — с 72,6 А до 62,9 А, второй ток — с 82,2 А до 69,8 А.

Таким образом, по графикам снятым с реального технологического объекта видно, что предлагаемая система мониторинга позволяет более быстро (ориентировочно 5—6 мин) и с большей чувствительностью (ориентировочно в 2,5—3 раза) диагностировать изменения внутримельничного заполнения относительно текущей оценки проводимой оператором мельницы по ряду признаков. В связи с полученным можно утверждать, что система управления в лице оператора или автоматизированной составляющей (в перспективе) будет видеть те изменения, которые она либо не видела, либо видела с запозданием на грани наступления перегруза.

Полученные результаты позволяют надеяться на реализацию более чувствительного способа оценки уровня заполнения барабана мельницы и сокращения времени реакции системы контроля при его изменении, что позволит сократить вероятность возникновения ситуации перегруза. Также результаты говорят о перспективности данной методики и в настоящее время планируются исследования функционирования системы в области перегруза мельницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прядко Н. С.*, *Музыка Л. В.* Контроль и управление процессами измельчения в измельчительных установках // Збагачення корисних копалин. — 2014. — Вип. 58(99)-59(100). — 6 с.

2. *Jian Tang, Li-jie Zhao, Jun-wu Zhou, Heng Yue, Tian-you Chai*. Experimental analysis of wet mill load based on vibration signals of laboratory-scale ball mill shell // Minerals Engineering Volume 23, Issue 9, August 2010, Pp. 720—730.

3. *Андреев С. Е.* Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. — М.: Недра, 1980. — 320 с.

4. *Алексеев М. А.* Автоматизированный контроль степени заполнения барабанных мельниц рудой // Науковий вісник НГУ. — 2014. — № 4. — С. 13—19.

5. *Сибирцева Н. Б.*, *Потапенко А. Н.*, *Семилетов Н. А.* Методы измерения уровня загрузки мельниц, основанные на физических процессах современных централизованных систем смазки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2010. — т. 12. — № 4(3). — С. 694—697.

6. *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.

7. *Леонов Р. Е.* Контроль заполнения мельницы по отношению долей частотных составляющих // Известия вузов. Горный журнал. — 2012. — № 3. — С. 111—113.

8. Jian Tang, Tianyou Chaia, Lijie Zhaoa, etc. Soft sensor for parameters of mill load based on multi-spectral segments PLS sub-models and on-line adaptive weighted fusion algorithm // Neurocomputing. 2012. No.78. Pp. 38—47.

9. *Gugel K., Moon R. M.* Automated mill control using vibration signal processing / IEEE Cement Industry Technical Conference, 2007. Pp. 17—25.

10. *Gugel K., Palcios G., Ramirez J., Parra M.* Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing technology / IEEE Cement Industry Technical Conference. Dallas, United States. 2003. Pp. 311—318.

11. *Юкио Сато*. Без паники! Цифровая обработка сигналов / Пер. с яп. Т. Г. Селиной. — М.: Додэка-XXI, 2010. — 176 с.: ил.

12. *Пожарский Ю. М.*, *Полещенко Д. А.*, *Подковыров И. Ю.* Определение степени заполнения мельницы мокрого самоизмельчения с применением беспроводных технологий // Горный журнал. — 2013. — № 2 — С. 115—118. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Полещенко Дмитрий Александрович — кандидат технических наук,
доцент, e-mail: po-dima@yandex.ru,
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал),
НИТУ «МИСиС» (СТИ НИТУ «МИСиС»).

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 12, pp. 153–160.

UDC 004.042, 622.73

D.A. Poleshchenko

COMMERCIAL OPERATION EXPERIENCE OF AUTOMATED MONITORING OF FILLING LEVEL IN BALL MILLS

Automated monitoring system development to control a ball mill filling level is considered. Accelerometers installed to both trunnions are used to obtain and estimate indirectly the ball mill state. The data from these sensors are processed by a proposed system on the basis of software and hardware by National Instruments. It is applied in real technological process of ore reduction at JSC Stoilensky GOK to conduct experiments.

The software part of the mentioned system contains a special criterion developed by us to process vibration acceleration signals in order to estimate the ball mill state. This criterion has shown high correlation to technological process parameters values. The most informative frequency range characterizing the mill state is determined. Its bandwidth is 1950–2200 Hz. The speed of and ability to response to external disturbances are chosen as efficiency criteria. Influence of these disturbances can be found in both proposed criterion and current signals of classifier spirals as the main indicator of the ball mill drum filling level for an operator. The proposed monitoring system makes it possible to detect changes in the mill filling level more rapidly (approximately 5–6 min) and with greater sensitivity (approximately 2.5 to 3 times) comparing to the current assessment procedure conducted by the operator. The results of the conducted experiments prove the expediency of the developed method usage.

Key words: mill feeling degree, acceleration gage, spectral analysis, ball mill, vibroacceleration._

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-12-0-153-160

AUTHOR

Poleshchenko D.A., Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, e-mail: po-dima@yandex.ru,
Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov,
National University of Science and Technology «MISiS» branch,
309530, Stary Oskol, Russia.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was conducted with financial support of applied scientific research by the Ministry of education and science of the Russian Federation, agreement № 14.575.21.0133 (RFMEFI57517X0133).

REFERENCES

1. Pryadko N. S., Muzyka L. V. *Zbagachennya korisnikh kopalin*. 2014, issue 58(99)—59(100), 6 p.

2. Jian Tang, Li-jie Zhao, Jun-wu Zhou, Heng Yue, Tian-you Chai. Experimental analysis of wet mill load based on vibration signals of laboratory-scale ball mill shell. *Minerals Engineering*. Volume 23, Issue 9, August 2010, Pp. 720—730.

3. Andreev S. E. *Droblenie, izmel'chenie i grokhochenie poleznykh iskopaemykh* (Crushing, grinding and screening of minerals), Moscow, Nedra, 1980, 320 p.

4. Alekseev M. A. *Naukoviy visnik NGU*. 2014, no 4, pp. 13—19.

5. Sibirtseva N. B., Potapenko A. N., Semiletov N. A. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2010. t. 12, no 4(3), pp. 694—697.

6. Ulitenko K. Ya., Markin R. P., Sokolov I. V. *Gornyy zhurnal*. 2009, no 10, pp. 72—76.

7. Leonov R. E. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2012, no 3, pp. 111—113.

8. Jian Tang, Tianyou Chaia, Lijie Zhaoa, etc. Soft sensor for parameters of mill load based on multi-spectral segments PLS sub-models and on-line adaptive weighted fusion algorithm. *Neurocomputing*. 2012. No.78. Pp. 38—47.

9. Gugel K., Moon R. M. Automated mill control using vibration signal processing. *IEEE Cement Industry Technical Conference*, 2007. Pp. 17—25.

10. Gugel K., Palcios G., Ramirez J., Parra M. Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing technology. *IEEE Cement Industry Technical Conference*. Dallas, United States. 2003. Pp. 311—318.

11. Yukio Sato. *Bez paniki! Tsifrovaya obrabotka signalov*. Per. s yap. T. G. Selinoy (No need to panic! Digital signal processing. Japan–Russian translation Selina T. G.), Moscow, Dodeka-XXI, 2010, 176 p.

12. Pozharskiy Yu. M., Poleshchenko D. A., Podkovyrov I. Yu. *Gornyy zhurnal*. 2013, no 2, pp. 115—118.