

Опыт использования анализатора ВАЗМ-1М в системах контроля и управления трубными мельницами и измельчительными переделами мельница – гидроциклон

УДК 621.926.5:681.5.08



И. В. Соколов,
заведующий сектором ТО
по внедрению АСУ ТП¹,
эл. почта: Sokolov@scma.ru



В. В. Морозов,
профессор²,
докт. техн. наук,
эл. почта: dchmgu@mail.ru



В. В. Васильев,
декан факультета аспирантуры
и докторантуры³,
канд. техн. наук,
эл. почта: Vasilev_VV@pers.spmi.ru



Е. А. Лебедик, ассистент кафедры
автоматизации технологических
процессов и производств³,
канд. техн. наук,
эл. почта: Lebedik_EA@pers.spmi.ru

¹ АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В. П.», Москва, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

В минерально-сырьевой промышленности активно применяются новые технологии, включая DEM-моделирование [1–3], системы технического зрения [4, 5], Big Data [6] и цифровые двойники [7, 8], для улучшения технико-экономических показателей предприятия, оценки качества продукции, а также для контроля износа оборудования в целях его своевременного обслуживания [9, 10]. Одним из возможных способов контроля состояния промышленных агрегатов является вибрационно-акустический анализ [11].

Известно, что работа измельчительных агрегатов (мельниц разного типа) сопровождается возникновением шумовых эффектов, обусловленных факторами физической природы (акустическим, вибрационным

и электрическим полями). При этом характеристики этих полей (интенсивность, частотные свойства) в значительной степени зависят от степени объемного заполнения барабана мельниц измельчаемым материалом [12–14], что предопределяет возможность построения систем стабилизации объемного заполнения аппарата [15], основанных на использовании этих эффектов [16, 17].

Основная особенность задачи контроля и управления работой трубных мельниц заключается в том, что это оборудование последовательно совмещает две функции процесса измельчения — собственно измельчение исходного продукта (1-я стадия процесса) и его доизмельчение до требуемой крупности (2-я стадия процесса) [18–20]. Первая стадия процесса (измельчение) реализуется в загрузочной камере (или зоне)

и электрическим полями). При этом характеристики этих полей (интенсивность, частотные свойства) в значительной степени зависят от степени объемного заполнения барабана мельниц измельчаемым материалом [12–14], что предопределяет возможность построения систем стабилизации объемного заполнения аппарата [15], основанных на использовании этих эффектов [16, 17].

Основная особенность задачи контроля и управления работой трубных мельниц заключается в том, что это оборудование последовательно совмещает две функции процесса измельчения — собственно измельчение исходного продукта (1-я стадия процесса) и его доизмельчение до требуемой крупности (2-я стадия процесса) [18–20]. Первая стадия процесса (измельчение) реализуется в загрузочной камере (или зоне)

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.09

и электрическим полями). При этом характеристики этих полей (интенсивность, частотные свойства) в значительной степени зависят от степени объемного заполнения барабана мельниц измельчаемым материалом [12–14], что предопределяет возможность построения систем стабилизации объемного заполнения аппарата [15], основанных на использовании этих эффектов [16, 17].

Основная особенность задачи контроля и управления работой трубных мельниц заключается в том, что это оборудование последовательно совмещает две функции процесса измельчения — собственно измельчение исходного продукта (1-я стадия процесса) и его доизмельчение до требуемой крупности (2-я стадия процесса) [18–20]. Первая стадия процесса (измельчение) реализуется в загрузочной камере (или зоне)

аппарата, а 2-я стадия (доизмельчение) — в разгрузочной камере (или зоне) [21–23].

Следовательно, контроль работы трубных мельниц необходимо проводить отдельно в каждой камере, но синхронно по времени, чтобы можно было контролировать не только нагрузочные и технологические параметры процесса, но и взаимосвязь работы камер (зон) [24–26].

Методика выполнения работы

Разработка отечественных систем автоматизированного контроля и управления технологическим процессом измельчения руды соответствует обозначенным проблемам минерально-сырьевого комплекса [27]. Виброакустический анализатор загрузки мельниц ВАЗМ-1М разработки АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В. П.» [28] позволяет решить задачу раздельного, но синхронного контроля работы камер (зон) трубных мельниц. В этом приборе реализован метод контроля технологической нагрузки мельницы, основанный на наличии корреляционной связи между параметрами ее объемной загрузки технологическими компонентами (исходным сырьем, мелящими телами, содовым раствором) и уровнем шумового поля аппарата (по вибрационному и/или акустическому компоненту). По интегральной амплитуде спектра виброакустического шума определяют комплексную технологическую нагрузку мельницы [29].

Метод спектрального анализа комплексной нагрузки мельницы поясняется отображением спектра шумового

поля мельницы на экране виртуальной панели визуализации анализатора ВАЗМ-1М, представленной на **рис. 1**.

Анализатор ВАЗМ-1М реализован как двухканальный прибор, синхронно обрабатывающий информацию, раздельно поступающую с двух независимых датчиков сигналов в едином информационном поле [30]. На экране визуализации отображаются окна контроля сигналов датчиков и спектры шумового поля мельницы. Спектральное отображение шумовых полей позволяет выбрать для оценки технологической нагрузки (объемной загрузки) мельницы тот диапазон спектра, который достоверно коррелирует с комплексной загрузкой аппарата компонентами процесса измельчения [31].

Для осуществления контроля шумового поля мельницы по вибрации выбран вибродатчик ВК-310А фирмы ВиКонт (Россия), а для фиксирования акустического поля — микрофонное устройство с узконаправленной характеристикой разработки АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В. П.».

Экспериментальная установка комплекса анализатора ВАЗМ-1М была реализована в марте 2015 г. на однокамерной трубной мельнице размолота известняка на участке подготовки шихты объекта ООО «БазэлЦемент-Пикалево». Там был реализован мокрый способ измельчения известняка с подачей в качестве жидкой фазы содового раствора. Особенностью однокамерной трубной мельницы являлось возникновение во время работы двух технологически взаимосвязанных зон — измельчения и доизмельчения.

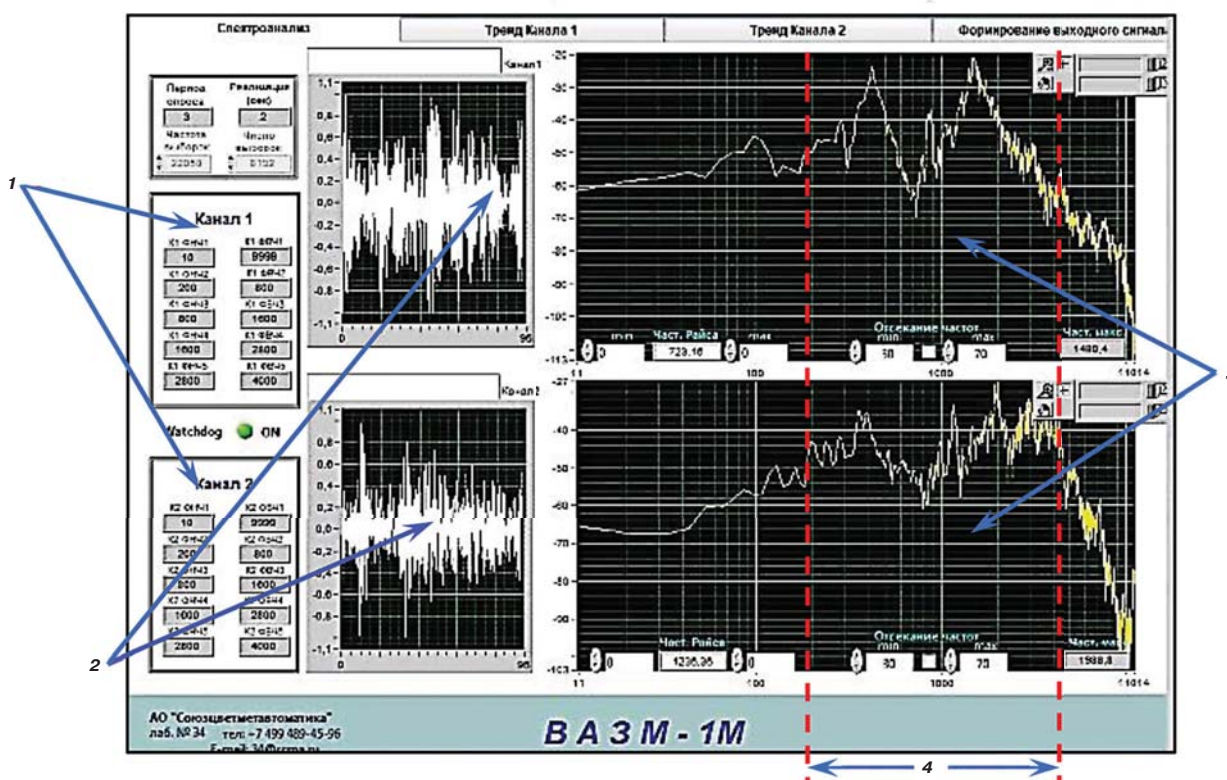


Рис. 1. Виртуальная панель визуализации анализатора ВАЗМ-1М (вид с экрана монитора): 1 — окна выбора частотного поддиапазона спектра; 2 — окна контроля сигналов датчиков; 3 — окна контроля спектра мельницы; 4 — выбранный поддиапазон спектра мельницы

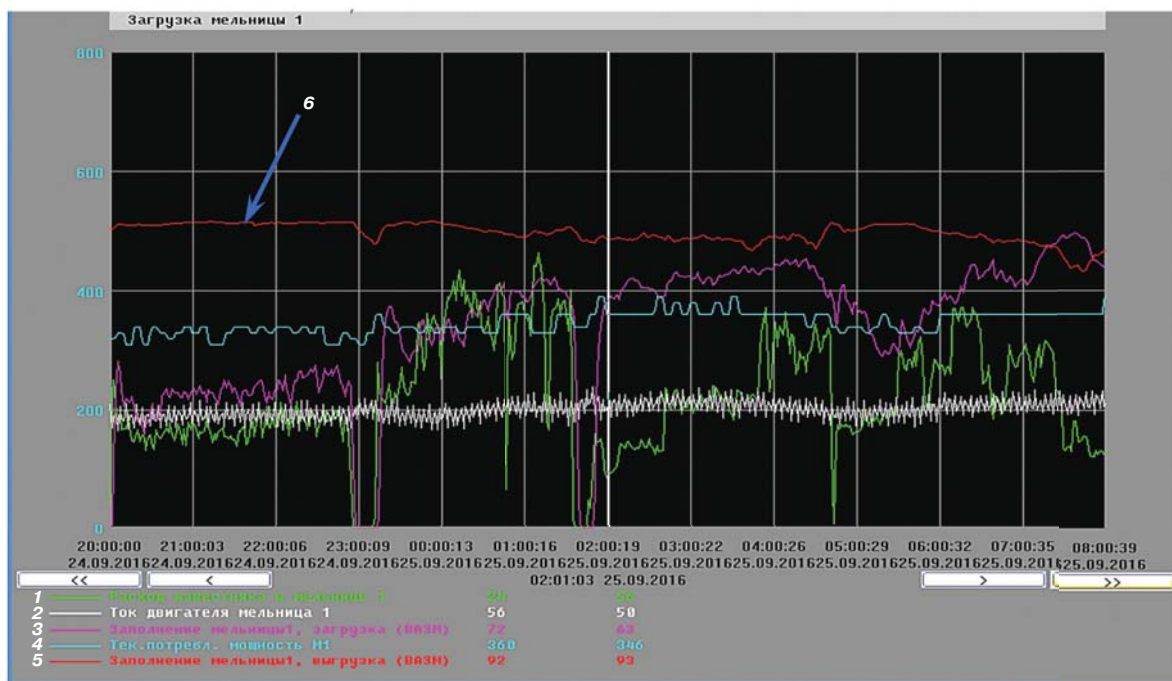


Рис. 2. Визуализация экрана SCADA-системы АСУ ТП объекта (вид с экрана монитора):

1 — расход известняка в мельнице; 2 — ток двигателя; 3 — заполнение (ВАЗМ); 4 — текущая потребляемая мощность; 5 — выгрузка (ВАЗМ); 6 — заиливание зоны доизмельчения

Целью работы была оценка возможности увеличения производительности аппарата с сохранением требований по заданному качеству продукта измельчительного передела. При этом анализатор ВАЗМ-1М использовали только в функции контрольного прибора. Опираясь на его показания, в процессе работы была проведена косвенная оценка влияния изменения свойств исходного сырья по измельчаемости, что по-разному отражалось на технологической нагрузке зон мельницы.

В первой камере (зоне основного измельчения) увеличение твердости исходного сырья приводило к повышению технологической нагрузки, замедлению процесса измельчения и, как следствие, накоплению материала в зоне, что в некоторых случаях уменьшало объем материала, передаваемого во вторую зону.

Технологический режим второй камеры (зоны доизмельчения) определялся двумя составляющими: объемом материала, поступающего из первой зоны, и твердостью материала. При этом мягкий известняк, переизмельченный в первой камере, чрезмерно заполнял объем второй зоны (заиливание зоны), затрудняя тем самым прохождение материала от загрузки мельницы до ее разгрузки, что приводило к нарушению технологического регламента работы¹. Эта ситуация проиллюстрирована на экране SCADA автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) (рис. 2).

Экспериментальная установка комплекса анализатора ВАЗМ-1М на двухкамерной мельнице размола

боксита была реализована в начале октября 2020 г. на соответствующем участке подготовки шихты АО «РУСАЛ Краснотурьинск».

Анализатор ВАЗМ-1М использовали в функции контрольного прибора. В течение некоторого периода набирали статистику и отслеживали взаимосвязь между показаниями ВАЗМ-1М, производительностью мельницы и степенью ее загруженности. Было замечено, что на сигнал от микрофона в некоторой степени влияет шум от работы рядом стоящей мельницы, поэтому было принято решение о замене микрофона на вибродатчик и установке его на выходной подшипник мельницы. Схема установки комплекса приведена на рис. 3.

После освоения анализатора ВАЗМ-1М было принято решение реализовать управление работой мельницы

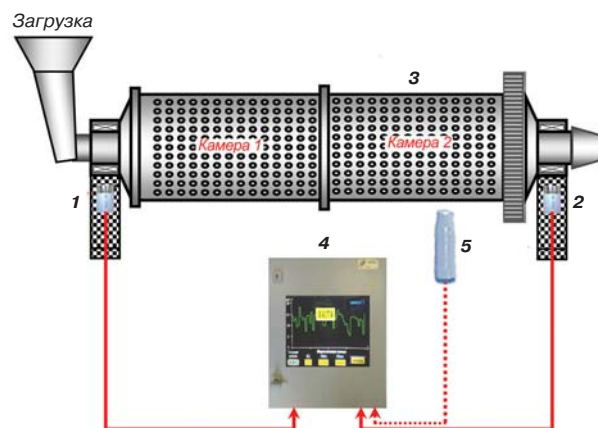


Рис. 3. Схема установки комплекса анализатора ВАЗМ-1М: 1, 2 — вибродатчик; 3 — мельница МШЦ 1948×10520; 4 — анализатор; 5 — микрофон

¹Анализ результатов эксплуатации виброакустического анализатора загрузки мельниц ВАЗМ-1М на ООО «БазэлЦемент-Пикалево». Отчет.

в автоматическом режиме от АСУ ТП объекта по показаниям ВАЗМ-1М о степени ее загрузки (на камере № 1). По контролю помол на выходе из аппарата определяли значения ВАЗМ-1М, при которых работа выполнялась удовлетворительно, и, изменяя подачу боксита и содового раствора в мельницу, старались поддерживать эти значения ВАЗМ-1М. Постепенно степень заполнения увеличивали и вышли на максимальную производительность МШЦ с 24,2 на 31,1 т/ч. Однако при этом помол сильно загрузили (содержание фракции +0,1 мм с 20,8 % доходило до 26 % и выше), что недопустимо, поэтому производительность сбавляли, контролируя помол по показаниям лабораторного анализа.

Рабочий экран SCADA-системы АСУ ТП при работе в рассматриваемом режиме приведен на **рис. 4**.

Было замечено, что степень заполнения мельницы изменяется циклически и нелинейно, что связано с периодическим заполнением и освобождением бункера от боксита. Когда бункер полон, в мельницу поступает мелкий боксит («просыпь»), в этом случае материал быстро проходит через мельницу и степень заполнения уменьшается. Если же боксит в бункере заканчи-

вается, в аппарат поступает крупный исходный продукт («откаты», которые образовались при заполнении бункера), в этом случае степень заполнения мельницы увеличивается. Таким образом, мельница работает нестабильно. Однако в таком режиме работы оператор, руководствуясь показаниями ВАЗМ-1М, имеет возможность увеличивать подачу боксита, не опасаясь бесконтрольного перегруза мельницы. Степень заполнения мельницы отображается в реальном времени, и оператор успевает снизить подачу боксита, чтобы разгрузить мельницу. На этом этапе производительность аппарата была увеличена с 24,2 до 27,9 т/ч.

Продолжая эксперимент, в программу АСУ ТП был введен алгоритмический блок автоматического поддержания заданной степени заполнения первой камеры мельницы посредством динамического изменения подачи боксита и содового раствора.

Рабочий экран SCADA-системы АСУ ТП при работе в этом режиме приведен на **рис. 5**.

Управление по степени заполнения первой камеры позволило стабилизировать работу мельницы, что, соответственно, дало возможность увеличить производительность без риска перегруза аппарата, снизить

нагрузку на футеровку, а также уменьшить разброс (дисперсию) качества выходного потока пульпы по помолу (см. рис. 5, левая половина графика). На рис. 5 видно, что стабилизация степени заполнения первой камеры не обеспечивает стабилизацию заполнения второй. Это объясняется тем, что при таком режиме первая камера косвенно реализует функцию фильтра по качеству загружаемого боксита, а вторая — режим доизмельчения (см. рис. 5, правая половина графика — работа в ручном режиме управления).

При оценке стабилизации качества пульпы по помолу предполагается, что при одинаковой степени заполнения мельницы бокситом качество измельчения должно быть примерно в одном диапазоне. Однако при этом необходимо учитывать, что на помол влияет не только степень заполнения мельницы бокситом, но и качество исходного материала, объем и качество содового раствора и стабильность их соотношения.

Для оценки зависимости показаний ВАЗМ-1М от качества пульпы был проведен сравнительный анализ 17 проб пульпы, отобранных с выхода мельницы № 4, с показаниями ВАЗМ-1М по камерам № 1 и № 2. Расчеты показали, что коэффициент линейной

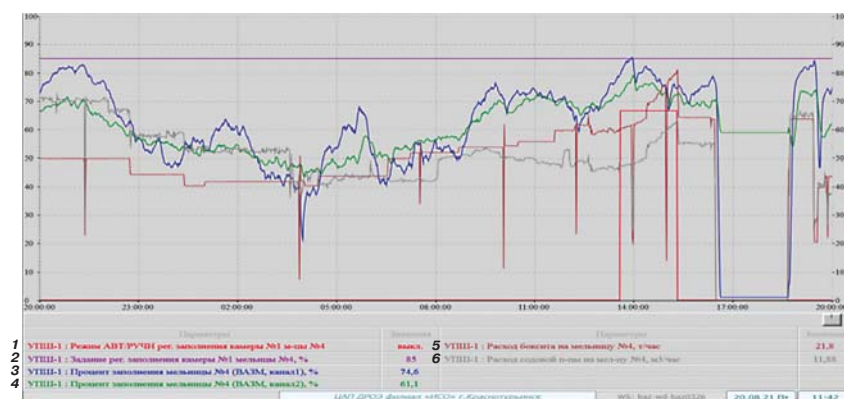


Рис. 4. График трендов основных параметров при управлении мельницей по показаниям анализатора ВАЗМ-1М (вид с экрана монитора): 1 — режим авт./ручн. регулирования заполнения камеры № 1 мельницы; 2 — задание регулирования заполнения камеры № 1; 3 — процент заполнения мельницы (ВАЗМ, канал 1); 4 — процент заполнения мельницы (ВАЗМ, канал 2); 5 — расход боксита, т/ч; 6 — расход содовой пульпы, м³/ч

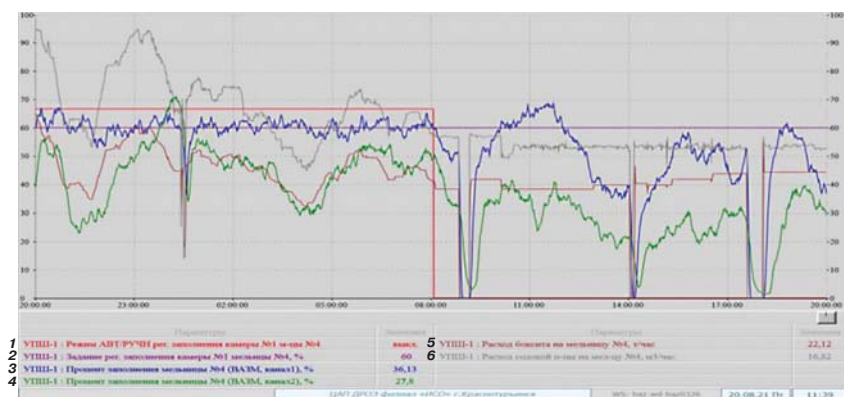


Рис. 5. График трендов основных параметров при управлении мельницей по показаниям канала 1 анализатора ВАЗМ-1М (вид с экрана монитора). Обозначения см. рис. 4

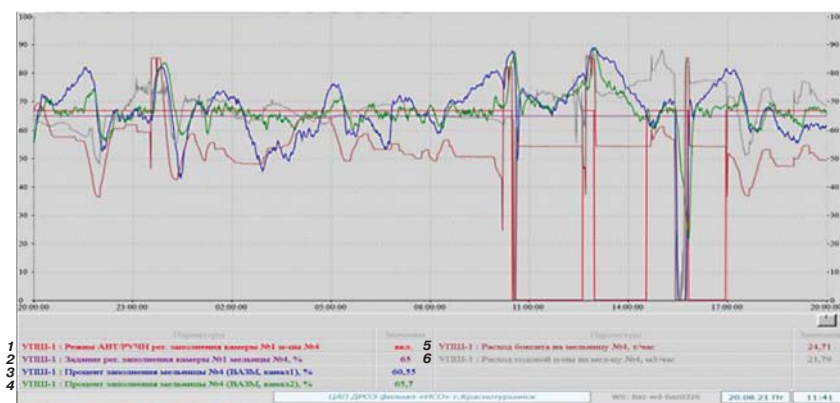


Рис. 6. График трендов основных параметров при управлении мельницей по показаниям канала 2 анализатора ВАЗМ-1М (вид с экрана монитора). Обозначения см. рис. 4

корреляции Пирсона находится в зоне значимости и составляет, соответственно, для камеры № 1 — 0,56, для камеры № 2 — 0,84.

По результатам анализа был сделан вывод о том, что степень заполнения камеры № 2 больше влияет на помол, чем степень заполнения камеры № 1. Исходя из этого, далее было принято решение о выборе режима управления по показаниям канала 2 анализатора ВАЗМ-1М, т. е. режима стабилизации степени заполнения камеры № 2. Рабочий экран SCADA-системы АСУ ТП при работе в данном режиме приведен на рис. 6.

Стабилизация степени заполнения камеры № 2 отчетливо видна на рис. 6 (левая половина графика). При этом разброс степени заполнения камеры № 1, обусловленный изменением характеристик боксита и раствора, сглаживается в автоматическом режиме.

Результаты исследования и их обсуждение

Внедрение автоматического управления работой мельницы по критериям стабилизации степени заполнения камер материалом позволяет оптимизировать режимы ее работы по технологической нагрузке, а также

уменьшить удельный расход электроэнергии².

За период проведения промышленной эксплуатации с октября 2020 г. по июль 2021 г. получены следующие результаты:

- производительность мельницы увеличена с 24,2 до 28,6 т/ч (+4,4 т/ч, или на 18,2 %);
- удельный расход электроэнергии снижен с 12,6 до 10,6 кВт·ч/т (-2,0 кВт·ч/т, или на 15,8 %).

Разработка комбинированных систем управления комплексами измельчение – классификация представляет собой лидирующий тренд

в области совершенствования процессов рудоподготовки [32–35].

Заключение

При использовании разработанных систем управления процессом измельчения удалось повысить производительность мельницы и сократить расход электроэнергии на 3,4 %. Повышение технико-экономических показателей обогащения и производительности измельчительного передела обеспечило получение годового экономического эффекта в 534 тыс. долл. США.

Опыт использования анализатора ВАЗМ-1М в системах контроля и управления трубными мельницами и измельчительными переделами мельница – гидроциклон был представлен на V Международном семинаре «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогатительном производстве, металлургии и экологии» 11–12 октября 2022 г. (Москва).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 71–76
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.09

THE PRACTICE OF USING VAZM-1M ANALYZER IN MONITORING AND CONTROL SYSTEMS DESIGNED FOR TUBE MILLS AND MILL/CYCLONE STAGES

Information about authors

I. V. Sokolov, Responsible for Process Control System Deployment at the Engineering Department¹, e-mail: Sokolov@scma.ru

V. V. Morozov, Professor², Doctor of Technical Sciences, e-mail: dchmggu@mail.ru

V. V. Vasiliev, Dean of the Faculty for Postgraduate and Doctoral Studies³, Candidate of Technical Sciences, e-mail: Vasiliev_VV@pers.spmi.ru

E. A. Lebedik, Assistant Lecturer at the Department of Process and Plant Automation³, Candidate of Technical Sciences, e-mail: Lebedik_EA@pers.spmi.ru

¹Soyuzsvetmetavtomatika JSC, Moscow, Russia.

²National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia.

³Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

This paper examines the problem of monitoring of and control over tube mills, which lies in the fact that such mills combine two successive grinding functions – actual grinding of the initial product (1st chamber) and its regrinding to the required size (2nd chamber). It is concluded that each chamber of the tube mill should be controlled separately but synchronously, so that not only the load and process parameters were controlled, but also the two chambers (zones) in their interaction.

The paper substantiates that the problem of separate but synchronous control of the chambers (zones) of a tube mill can be solved with the help of a vibroacoustic mill charge analyzer VAZM-1M developed by Soyuzsvetmetavtomatika JSC. The analyzer monitors and controls the mill load based on the correlation between the volume load of the mill (feed material,

²Программа проведения опытно-промышленных испытаний виброакустического анализатора загрузки мельниц «ВАЗМ-1М» на АО «РУСАЛ Краснотурьинск», 2019 г. : отчет.

grinding media, soda solution) and the noise level (based on vibration and/or acoustics).

The paper describes the actual performance of the VAZM-1M analyzer when it was used in a single-chamber mill and a two-chamber mill at the facilities of BazelCement-Pikalevo LLC and RUSAL Krasnouryinsk JSC.

Key words: tube mill, ball mill, filling, performance, vibroacoustic noise, load analyzer, correlation, process load, charging options, chamber, grinding.

References

- Boikov A. V., Savelev R. V., Payor V. A. et al. The control method concept of the bulk material behavior in the pelletizing drum for improving the results of DEM-modeling. *CIS Iron and Steel Review*. 2019. No. 1. pp. 10–13. DOI: 10.17580/cisir.2019.01.02.
- Fedorova E., Pupyshva E., Morgunov V. Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a thickener using the combined CFD-DPM approach. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/sym14112314.
- Beloglazov I. I., Sabinin D. S., Nikolaev M. Yu. Modeling the disintegration process for ball mills using DEM. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022. No. 6–2. pp. 268–282. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_268.
- Kashin D. A., Kulchitskiy A. A. Image-based quality monitoring of metallurgical briquettes. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 9. pp. 92–98. DOI: 10.17580/tsm.2022.09.13.
- Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Y. Automatic system for detecting visible emissions in a potroom of aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurgist*. 2023. DOI: 10.1007/s11015-023-01445-z.
- Vasilyeva N., Fedorova E., Kolesnikov A. Big data as a tool for building a predictive model of mill roll wear. *Symmetry*. 2021. Vol. 13. DOI: 10.3390/sym13050859.
- Nguyen H. H., Bazhin V. Y. Optimization of control system for electrolytic copper refining with digital twin during dendritic precipitation. *Metallurg*. 2023. No. 1. pp. 49–56. DOI: 10.52351/00260827_2023_01_49.
- Bazhin V., Masko O. Monitoring of the behaviour and state of nanoscale particles in a gas cleaning system of an ore-thermal furnace. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/sym14050923.
- Zhukovskiy Y. L., Korolev N. A., Malkova Y. M. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 256. pp. 686–700. DOI: 10.31897/pmi.2022.91.
- Prokhorenko E., Klepikov V., Lytvynenko V., Khaymovich P. et al. Diagnostics of processes of wear of materials of ball-tube mills. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. No. 1. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36638.
- Hambric S. A., Sung S. H., Nefske D. J. Engineering vibroacoustic analysis: methods and applications. *Engineering Vibroacoustic Analysis: Methods and Applications*. 2014. DOI: 10.1002/9781118693988.
- Ulitenko K. Ya., Sokolov I. V., Markin R. P., Naydenov A. P. Automation of comminution processes in concentration and metallurgy. *Tsvetnye Metally*. 2005. No. 10, Special issue. pp. 54–59.
- Fahy F., Gardonio P. Sound and structural vibration. *Sound and Structural Vibration*. 2007. DOI: 10.1016/B978-0-12-373633-8.X5000-5.
- Wada T., Uematsu T., Shiomi H., Osaki K. et al. Prediction of power of a vibration rod mill during cellulose decrystallization processing by DEM. *Advanced Powder Technology*. 2021. Vol. 32, Iss. 10. DOI: 10.1016/j.apt.2021.08.027.
- Morozov V. V., Topchaev V. P., Ulitenko K. Ya., Ganbaatar Z. et al. Development and application of automated systems of control of mineral dressing processes. Moscow: "Ore and Metals" Publishing House, 2013. pp. 100–106.
- Feng L., Yang F., Zhang W., Tian H. Model predictive control of duplex inlet and outlet ball mill system based on parameter adaptive particle swarm optimization. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. DOI: 10.1155/2019/6812754.
- le Roux J. D., Steinboeck A., Kugi A., Craig I. K. Steady-state and dynamic simulation of a grinding mill using grind curves. *Minerals Engineering*. 2020. Vol. 152. pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106208.
- Lvov V. V., Chitalov L. S. Modern trends in the design of processes and equipment for grinding of ores of non-ferrous metals. *Tsvetnye Metally*. 2020. No. 10. pp. 20–26. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03.
- Asbjörnsson G., Tavares L. M., Mainza A., Yahyaei M. Different perspectives of dynamics in comminution processes. *Minerals Engineering*. 2022. Vol. 176. pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107326.
- Dmitrak Yu. V. Motion of grinding load in ball mills. *Vektor GeoNauk*. 2021. Vol. 4, No. 1. pp. 28–36. DOI: 10.24411/2619-0761-2021-10003.
- Verdiyev M. A., Golovin E. N., Lesikhina A. I. et al. Partitioned tube mills. *Tsement*. 1987. No. 7. pp. 20–21.
- Kremcheev E. A., Kremcheeva D. A. Methodological approaches to controlling the feed breakage process in drum and tube mills based on the results of vibroacoustic diagnostics. *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017. Vol. 33, Iss. 1. pp. 787–791.
- Strasser S. Current status of the comminution process developed by KHD Humboldt Wedag AG. *Tsement i ego primeneniye*. 2002. No. 1. pp. 27–30.
- Duda V. Cement. Moscow: Stroyizdat, 1981. 464 p.
- Lepikhova V. A., Lyashenko N. V., Chibinev N. N., Vyal'tsev A. V. et al. Theoretical substantiation of the principles of continuous control of grinding equipment modes at the stage of cereal formation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 979, Iss. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/979/1/012061.
- Adambaev M. D., Baynazarova L. A., Togzhanova Zh. K. A method of coherent by-chamber feed control for two-chamber separator mill and a device to implement it. Certificate of authorship RK, No. 15804. Published: 15.06.2005.
- Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V. et al. Analyzing the role of the state in the mineral resources management. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
- Vibroacoustic mill charge analyzer VAZM-1M. Available at: <http://www.sema.ru/ru/products/2-444.html>.
- Demin A. V., Sokolov I. V., Khaymovskiy S. S. Soyuzsvetmetavtomatika process automation solutions for cement industry. *TsementInform*. 2020. No. 2. pp. 6, 7.
- Sokolov I. V., Kuzyakov A. V. On the problem of control over the primary grinding mill ball charging. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 3. pp. 17–22.
- Damba-Ochir D., Kimyaev I. T., Ulitenko K. Ya. The concept behind a grinding control system built on the basis of vibroacoustic mill charge analyzer VAZM-1M. *Tsvetnye Metally*. 2003. No. 10. pp. 112–115.
- Yalin Wang, Xiaofang Chen, Weihua Gui, Chunhua Yang et al. A hybrid multiobjective differential evolution algorithm and its application to the optimization of grinding and classification. *Mathematical Approaches in Advanced Control Theories*. 2013. Vol. 2013. DOI: 10.1155/2013/841780.
- Tie Qiang Sun, Cui Xue Xie, Zhi Qi Qiu. Iron ore grinding energy conservation research based on neural network. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 385–386. pp. 1722–1725. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.385-386.1722.
- Yehorov V. System analysis of the technological processes stability. *Revista Română de Informatică și Automatică*. 2019. Vol. 29, Iss. 2. pp. 49–62.
- Tuz A. A., Sanaeva G. N., Prorokov A. E., Bogatkov V. N. Grinding process control and key automation areas. *Naukovedenie*. 2016. Vol. 8, No. 2. DOI: 10.15862/92TVN216.