

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 622.732

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПОДХОДОВ К УПРАВЛЕНИЮ ДРОБИЛКАМИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА ПРОИЗВОДСТВА ЗАО «УРАЛ-ОМЕГА» С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМОГО ПРОДУКТА

Бурнашев Р.Э., Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В., Рябчикова Е.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

Аннотация. В работе рассмотрены перспективы дальнейшего совершенствования управления работой дробилок центробежного типа производства ЗАО «Урал-Омега» с целью обеспечения их максимальной производительности при поддержании требуемого качества получаемого продукта при заданных технологических ограничениях по нагрузке на двигатель. Предлагается использование двухконтурной системы управления процессом дозирования дробимых материалов с обеспечением рациональной скорости их разгона в камере измельчения. Задачей системы является возможность управления процессом дробления в условиях действующих возмущений по свойствам исходных материалов, таким как прочность и влажность, с оперативным контролем оценок качества получаемого продукта по доли и лещадности различных фракций.

Ключевые слова: управление качеством, центробежная дробилка, измельчение рудных и нерудных материалов, оптимизация управления дозированием.

Введение

Дробилки центробежно-ударного действия с вертикальным ротором на данный момент являются новейшими и наиболее перспективными дробильными машинами. Это связано с тем, что разрушение свободным ударом материала о материал или материала об отбойную плиту имеет ряд преимуществ в качественном отношении в сравнении с разрушением дробящим механизмом, например, отбойной плитой щековой дробилки [9].

Модификации центробежных дробилок разной производительности и предназначенные для работы с различными материалами могут применяться в таких отраслях, как обогащение руд, измельчение рудных и нерудных материалов, производство цементов и т.д. [10].

Принцип действия центробежной дробилки представлен на **рис. 1**. Исходный материал через загрузочную воронку подается в центр вращающегося ускорителя, который с большой скоростью разбрасывает материал в камере измельчения на отбойную поверхность, сформированную

исходным материалом. Далее материал дробится, свободно падает вниз и через выгрузные каналы подается для дальнейшего использования.

Основным элементом конструкции дробилки является ускоритель, разгоняющий материал до высокой скорости и выбрасывающий его в камеру измельчения. Вентилятор наддува подает воздух в камеру наддува и создает так называемую «воздушную подушку» между ротором и статором. При работе дробилки ротор выполняет несущую функцию рабочего органа и воспринимает ударные осевые и тангенциальные нагрузки от ускорителя. Статор представляет собой неподвижную сферообразную «чашу», выполняющую функцию воздушно-опорного узла [3].

Основным преимуществом центробежных дробилок по сравнению с любыми конусными дробилками является более качественный готовый продукт. Оценками качества выступает фракционный состав и лещадность или кубовидность продуктов дробления. ГОСТ 8267-82 «Щебень и гравий из плотных горных пород для

строительных работ» определяет кубовидный щебень как щебень, зерна которого имеют форму куба, при содержании зерен пластинчатой (лещадной) и игольчатой формы до 15%.

На конусных дробилках наиболее качественной является фракция 10–20 мм. Во фракции 5–10 мм содержание лещадных зерен может достигать до 30%. Во фракции 0–5 мм лещадность практически всегда превосходит 50%. Такая высокая лещадность не позволяет использовать отсе́вы дробления, как искусственный песок. То есть более 25–30% результатов дробления не может использоваться и выкидывается, занимая

отвалами большие земельные площади и снижая рентабельность производства [4].

Лещадность продуктов дробления, полученных на центробежных дробилках, не превышает 10%, и получаемый щебень относится к первой категории качества. Отсевы дробления (фракция 0–5 мм), как правило, получаются с лещадностью ниже 13–15%, что позволяет их использование в строительстве в качестве искусственного песка.

Особенностью центробежных дробилок является рост доли отсе́вов 0–5 мм на 5–10%, количество которых увеличивается с ростом оборотов двигателя и скорости удара (рис. 2).

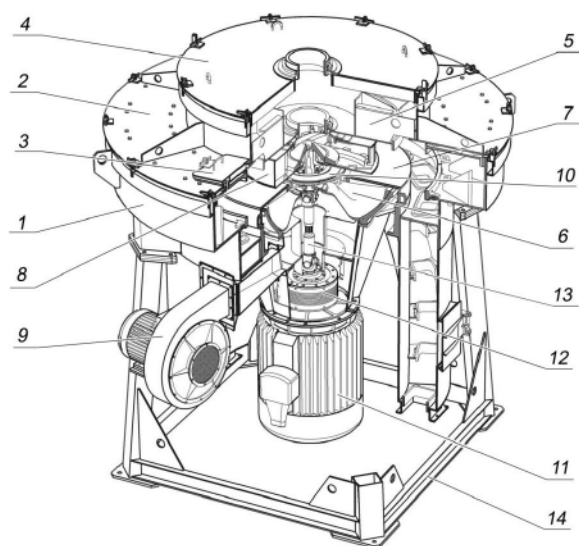
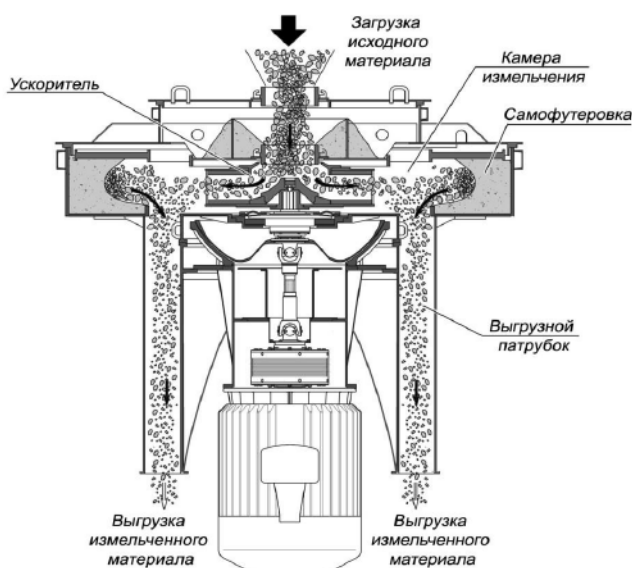


Рис. 1. Принцип действия и конструкция центробежной дробилки [1–3]:

1 – корпус с камерой измельчения и выгрузными патрубками; 2 – крышка корпуса; 3 – смотровой люк; 4 – крышка (с загрузочной воронкой); 5 – внутренняя вставка с воронкой; 6 – воздушно-опорный узел; 7 – крышка воздушно-опорного узла; 8 – ускоритель; 9 – вентилятор наддува; 10 – подшипниковая опора; 11 – электродвигатель привода дробилки; 12 – муфта; 13 – карданный вал; 14 – рама

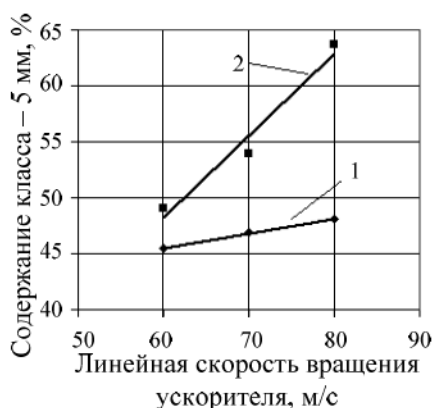
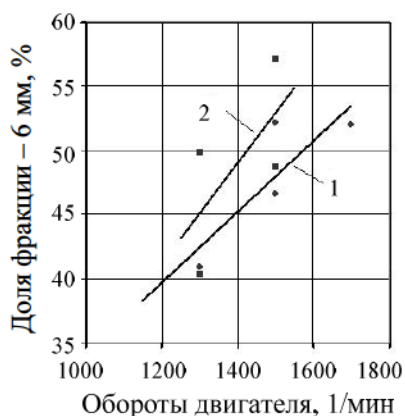


Рис. 2. Зависимости доли отсе́вов центробежной дробилки ЗАО «Урал-Омега» производительностью 150 т/ч от: а – оборотов двигателя привода дробилки, полученная при дроблении гранита (1 – ускоритель $\varnothing$ 1,1; 2 – ускоритель $\varnothing$ 1,25); б – линейной скорости вращения ускорителя (1 – гранит ДС-0.4; 2 – гравий ДС-0.4)

Прочность и лещадность получаемого продукта также зависят от скорости удара. При этом упрочнение, за счет дробления по наиболее слабым местам, идёт до скорости удара 50–65 м/с, а при более высокой скорости, достигающей 100 м/с, происходит образование новых трещин, что позволяет эффективно использовать шаровые мельницы для дальнейшего измельчения. Лещадность с ростом скорости удара снижается.

Из рис. 2 видно, что доля отсева зависит от оборотов двигателя и соответственно скорости удара. Также виден значительный разброс доли мелочи при постоянных оборотах, что связано с непостоянством свойств дробимых материалов. Существенным возмущающим фактором, оказывающим влияние как на качество получаемого продукта, так и на производительность дробилки, является непостоянство влажности исходных материалов.

На лещадность продукта оказывает влияние множество факторов, таких, например, как дробимость исходного материала, крепость по методу Протодяконова [2], исходный фракционный состав и лещадность сырья, скорость удара и др. (см. таблицу).

Результаты лабораторных испытаний ЗАО «Урал-Омега» для ряда материалов

Материал	Дробимость	Лещадность исходная, %	Скорость удара, м/с	Лещадность продукта, %	Изменение лещадности, %
Порфирит	1000	34,5	70	5	29,5
Щебень	1100	48	70	23,5	24,5
Диабаз	1400	38	60	11	27

В связи с указанными особенностями, выбор скорости удара, как правило, производится путем постановки серии экспериментов индивидуально для каждого нового исходного сырья. Из результатов проведенных в ЗАО «Урал-Омега» экспериментов (рис. 3) видно, что зависимости лещадности от скорости близки к линейным, за исключением диапазона низких уровней порядка 1–2%.

Несмотря на значительный объем накопленной экспериментальной информации, в настоящее время не удается получить общие статистические зависимости, которые могли бы использоваться в задачах оптимизации управления процессом дробления с учетом качества получаемой продукции.

Для автоматизации процесса дробления в подобных условиях необходима разработка новых и использование существующих методов оператив-

ного контроля качества материалов. При этом, если оперативный контроль доли отсевов, количество которых часто оговорено заказчиком, не представляет принципиальной сложности, то измерение лещадности является сложной задачей.

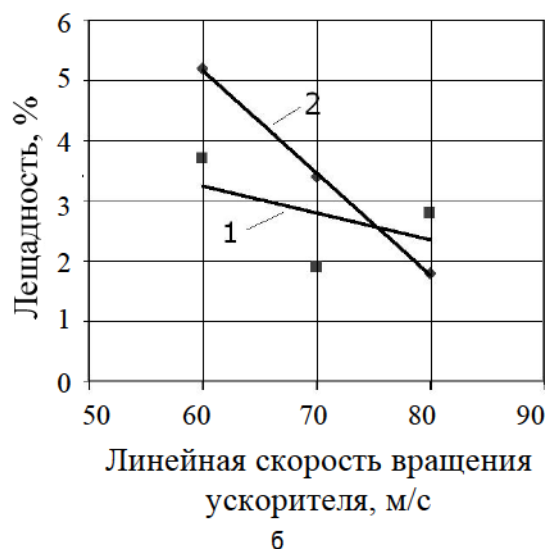
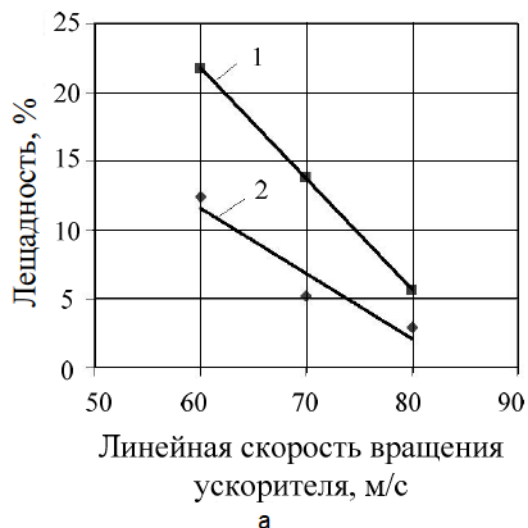


Рис. 3. Зависимость содержания лещадных зерен от линейной скорости вращения ускорителя для различных фракций и материалов: а – гранит ДС-0.4 (1 – 10–20 мм; 2 – 5–10 мм); б – гравий ДС-0.4 (1 – 10–15 мм; 2 – 5–10 мм)

Система автоматического управления процессом дробления

Важнейшим элементом автоматического управления качеством процесса дробления является автоматический контроль лещадности. Системы подобного типа существуют. Например, патент [5] предлагает автоматический измеритель лещадности щебня, отличающийся тем, что

он состоит из ленты, скользящей по металлической пластине, приводящейся в движение электроприводом, по которой движутся зерна щебня, попадающие в зону срабатывания инфракрасного датчика, ламп подсветки и видеокамер (рис. 4).

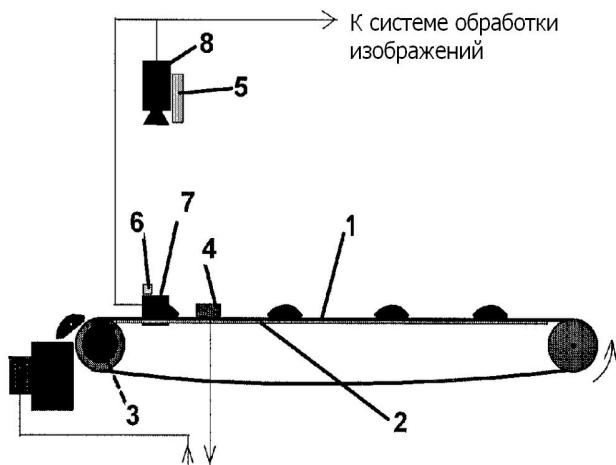


Рис. 4. Предлагаемый патентом [5] вариант организации контроля лещадности щебня:

- 1 – лента; 2 – металлическая пластина;
3 – электропривод; 4 – инфракрасный датчик;
5, 6 – лампы подсветки; 7, 8 – видеокамеры

Инфракрасный датчик посылает сигнал через плату оптической развязки, который, обрабатывая изображения с видеокамер, подключенных к плате видеозахвата, вычисляет линейные размеры зерна и решает, принадлежит зерно к лещадным или нет [5].

Контроль лещадности необходимо либо проводить отдельно для фракций различного размера 5–10 и 10–20 мм, либо, учитывая высокую стабильность лещадности для фракций различного размера, характерную для центробежных дробилок, возможен контроль в едином потоке. Общая структура процесса дробления с контролем лещадности и доли фракции –5 мм представлена на рис. 5.

Исходный материал в дробильно-сортировочную линию подается ленточным питателем №1 из бункера исходного материала. В соответствии с требованиями к питанию центробежной дробилки крупность исходного материала не должна превышать 70 мм. С ленточного питателя №1 исходный материал попадает на ленточный конвейер №1, который транспортирует сырье на грохот №1. На грохоте №1 отсеивается фракция 0–5 мм и транспортируется ленточным конвейером №2 в отвалы. Фракция

+5 мм с грохота №1 ленточным конвейером №3 транспортируются в промежуточный бункер. Промежуточный бункер используется для обеспечения стабильности питания центробежной дробилки. Загрузка в дробилку осуществляется ленточным питателем №2. Управление расходом исходного материала осуществляется изменением скорости движения ленты ленточного питателя №2.

Продукт центробежного дробления ленточным конвейером №4 транспортируется на грохот №2. На грохоте №2 дробленый материал разделяется на фракции 0–5, 5–10, 10–20 и 20–40 мм, которые транспортируются в соответствующие отвалы (или бункеры) конвейерами №8, 7, 6 и 5 соответственно.

На ленточном конвейере №5 установлена весоизмерительная система для определения количества отсева (продукта дробления фракции 0–5 мм). Также весоизмерительную систему целесообразно установить на ленточном конвейере №8 (если цикл замкнутый и фракция 20–40 мм является возвратом).

Для решения задач оптимизации управления предлагается система на основе двух контуров управления. Задачей быстродействующего контура является управление производительностью с использованием ленточного питателя №2 с целью ее вывода на максимально допустимый уровень, исходя из тока и мощности, потребляемой электродвигателем при обеспечении заданного числа оборотов. На рис. 6 показаны экспериментальные данные по зависимости нагрузки привода от расхода дробимых материалов при различных поддерживаемых оборотах двигателя.

На качество управления производительностью дробилки оказывают значимое влияние два основных типа возмущающих воздействий, связанных с особенностями дозирования материалов и постепенным изменением их свойств. Результаты оценки спектральных особенностей действия возмущений по току (рис. 7) позволяют предположить, что при периодах 20–40 с значительно влияние дозирования, а при периодах более 60–80 с сказывается непостоянство свойств дробимых материалов. Для проверки работоспособности предлагаемых алгоритмов управления использовали авторегрессионную (AR, $p=10$) модель возмущений по току при моделировании переходных процессов в контуре.

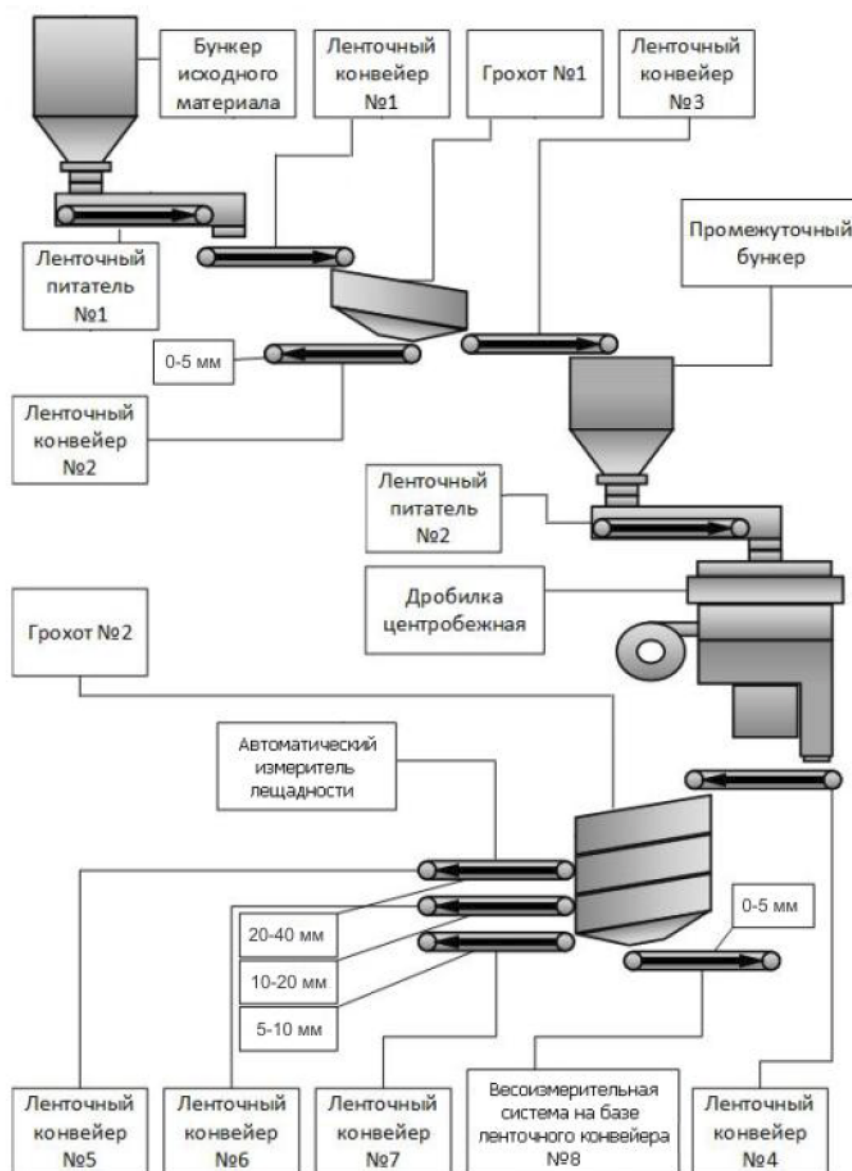


Рис. 5. Структура процесса дробления с контролем лещадности и доли фракции –5 мм

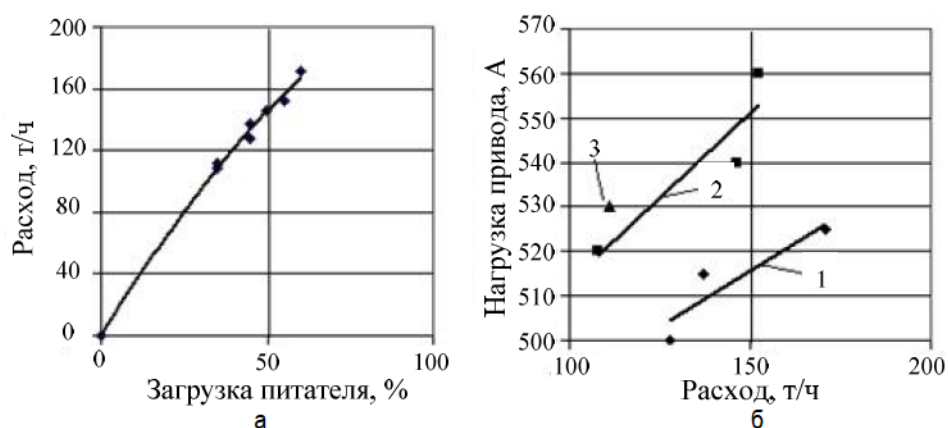


Рис. 6. Экспериментальные данные по зависимости нагрузки привода от расхода дробимых материалов при различных поддерживаемых оборотах двигателя:

а – статическая характеристика питателя; б – влияние расхода при разных оборотах двигателя на нагрузку привода; 1 – 1200 об/мин; 2 – 1500 об/мин; 3 – 1700 об/мин

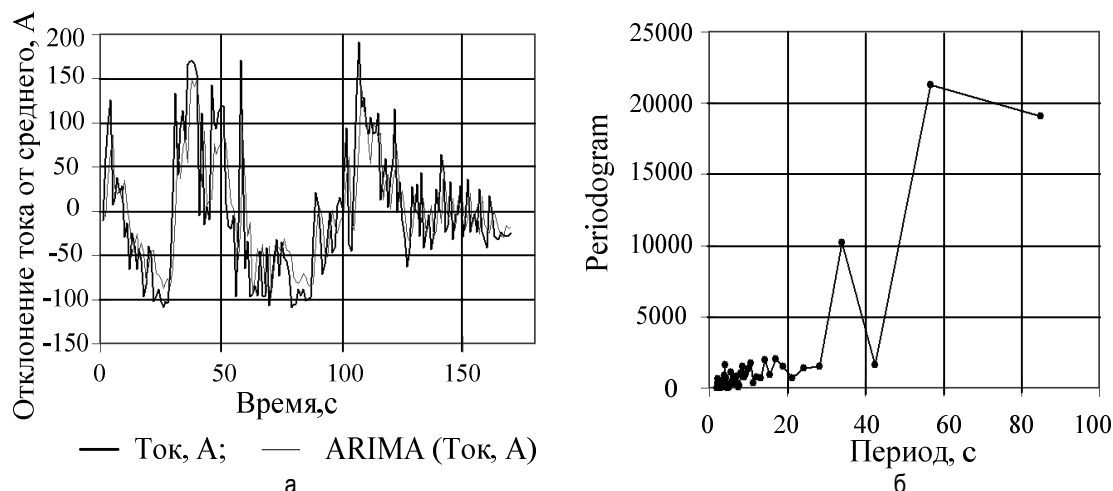


Рис. 7. Пример отклонений тока от среднего уровня при дроблении гранита с постоянным расходом (а) и полученные спектральные оценки возмущений (б)

Экспериментальные данные позволили получить приближенную линейную модель влияния уровня поддерживаемых оборотов асинхронного двигателя n (об/мин) и расхода гранита V (т/ч) на момент нагрузки на валу двигателя:

$$M = 976 + 11,84 \cdot n - 0,85 \cdot V - 0,00141529 \times \\ \times n \cdot V - 0,028 \cdot n^2 + 0,00033 \cdot V^2 \quad (\text{Н} / \text{м}),$$

что совместно с моделью возмущений позволяет проводить проверку работоспособности системы управления расходом в условиях, приближенных к реальным.

Задачей второго контура является изменение задания по числу оборотов в разрешенных пределах с целью оптимизации оперативно контролируемого качества получаемой продукции, которое оценивается по лещадности различных фракций и доли мелочи – 5 мм.

Для решения задачи управления качеством предлагается использовать метод Герды Айрон [6], который предполагает управление оборотами двигателя путем одновременного взвешенного учета сигналов рассогласования по нескольким указанным информационным показателям. Алгоритм управления можно представить следующими уравнениями:

$$\Delta X_i^{\phi, \text{ном}} = X_i^{\phi} - X_i^{\phi, \text{зад}},$$

$$\Delta X_i^{\phi, \text{рас}} = \Delta X_i^{\phi, \text{ном}} - X_i^{\phi, \text{пр}},$$

$$k_i = \frac{G_{\Delta L}^2}{G_{\Delta X_i^{\phi, \text{ном}}}^2 + G_{\Delta L}^2 + N},$$

$$U = \sum_{i=1}^3 k_i \Delta X_i^{\phi, \text{рас}},$$

(1)

где $\Delta X_i^{\phi, \text{ном}}$ – отклонение между измеренным значением показателя и директивно заданным; $\Delta X_i^{\phi, \text{рас}}$ – рассогласование между измеренным отклонением и спрогнозированным; k_i – весовые коэффициенты сигналов рассогласования; $G_{\Delta L}^2$ – дисперсия сигнала, пропорционального входному воздействию на регулятор управления оборотами двигателя; $G_{\Delta X_i^{\phi, \text{ном}}}^2$ – дисперсия сигнала, пропорционального измеренному отклонению показателя от заданного значения; U – воздействие в систему управления оборотами двигателя.

Управляющее воздействие, полученное по формуле (1), может использоваться как для прямой корректировки задания на обороты двигателя, так и может являться входным параметром типового ПИД-регулятора. Задачей подобной системы является определение рационального компромисса при поддержании на заданных уровнях значений контролируемых показателей качества путем контроля связи между дисперсиями рассогласований и управляющего параметра.

На рис. 8–9 представлены результаты моделирования переходных процессов в двухконтурной системе оптимизации управления работой центробежной дробилкой. Видно, что система поддерживает ток на заданном уровне 490 А, а также обеспечивает компромиссное решение при одновременной стабилизации лещадности фракций 5–10, 10–20 мм и доли фракции – 5 мм.

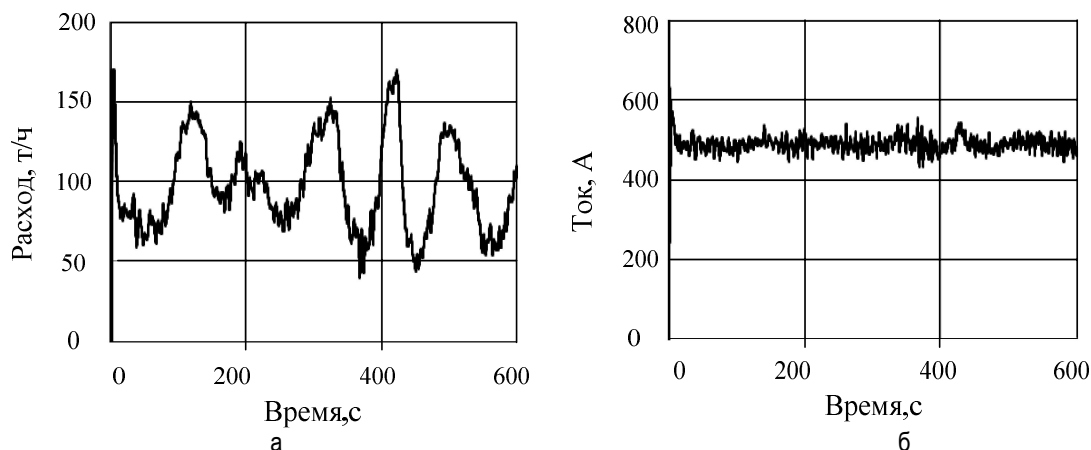


Рис. 8. Переходный процесс в контуре управления производительностью при моделировании совместной работы двухконтурной системы

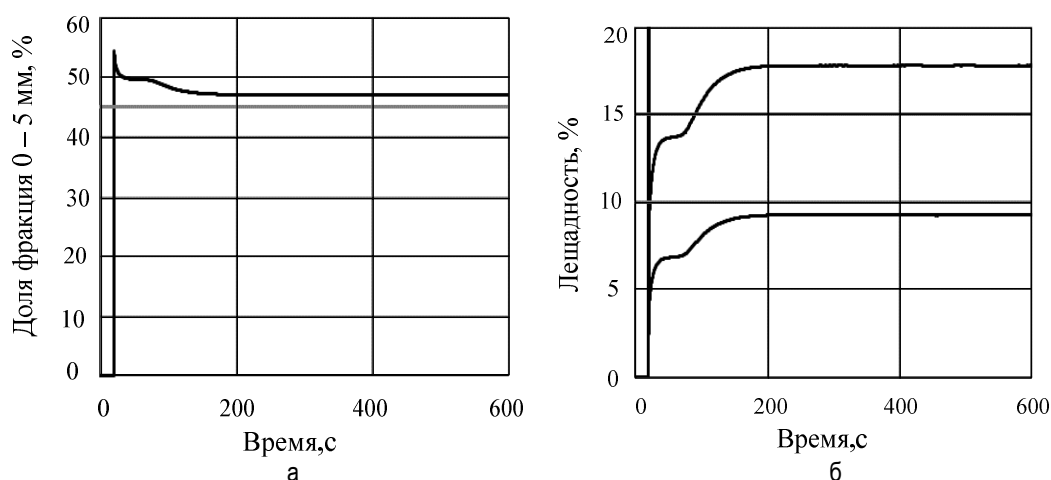


Рис. 9. Переходные процессы: по доле фракций – 5 мм (а: 1 – фактическое; 2 – заданное значение) и по лещадности (б: 1 – фактическая фракции 10–20; 2 – заданная для фракции 10–20; 3 – фактическая фракции 5–10; 4 – заданная фракции 5–10)

Заключение

В течение последнего десятилетия дробилки центробежного типа оказываются все более востребованными в различных отраслях промышленности, требуя разработки и использования современных интеллектуальных систем управления, функционирующих с учетом качества получаемой продукции. Однако до настоящего времени подходы к управлению ими изучены недостаточно. Практический опыт разработки и использования систем управления такими дробилками в ЗАО «Урал-Омега» показал, что основные сложности управления ими связаны с непостоянством свойств дробимых материалов, приводящим к существенным колебаниям нагрузки на двигатель в широком диапазоне частот, а также к изменению лещадности продукции и доли мелких фракций, количество которых часто оговаривается заказчиком.

Проводимые в настоящий момент исследова-

ния на базе лаборатории испытаний материалов в ЗАО «Урал-Омега» направлены на поиск новых способов оперативной оценки качества продукции, что позволяет значимо повысить технико-экономические показатели работы предприятия за счет комплексной оптимизации управления производительностью [7, 8] и качеством.

Список литературы

1. Бурнашев Р.Э. Управление устройством плавного пуска вентилятора центробежной дробилки по протоколу Modbus в условиях ЗАО «Урал-Омега» // Автоматизированные технологии и производства. 2013. № 5. С. 291-295.
2. Бурнашев Р.Э., Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В. Управление работой центробежной дробилки СС-0.36 с учетом значения коэффициента крепости исходного материала по методу Протодьяконова // Автоматизированные технологии и производства. 2014. № 6. С. 203-208.
3. Дробилка центробежная. Руководство по эксплуатации / НПО «Минск». 2013. 51 с.
4. Конкурентные преимущества дробилок Титан при производстве щебня. Режим доступа: www.ntds.ru.

5. Пат. 68523 РФ, МПК E01C. Автоматический измеритель лещадности щебня / Аникин П.М. Опубл. 27.11.2007.
6. Системные факторы оценки работоспособности электротехнических комплексов на основе интегrostохастических критериев энергоэффективности / И.Д. Труфанов, А.П. Лютый и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. (48) 2010. С. 46–58.
7. Нечеткое экстремальное управление процессом измельчения руды для обеспечения максимальной производительности / Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Полько П.Г., Логунова О.С., Рябчикова Е.С., Головкин Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С. 65–69.
8. Достижение максимальной производительности оптимизируемого процесса измельчения руды при использовании принципов нечеткого экстремального управления / Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С., Рябчикова Е.С., Головкин Н.А., Полько П.Г. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №2. С. 5–9.
9. Хопунов Э.А. Селективное разрушение как частный случай дезинтеграции руд // Обогащение руд. 2010. №6. С. 27–33.
10. Бороха Э.Л., Воробьев В.В., Горобец А.В. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа // Центробежная техника – высокие технологии. 2008. С. 5–16.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

THE STUDY OF PROBABLE APPROACHES TO CONTROLLING THE CENTRIFUGAL-TYPE CRUSHERS MANUFACTURED BY URAL-OMEGA CJSC FACTORING IN THE PRODUCT QUALITY

Burnashev Ruslan Erikovich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: bre@uralomega.ru.

Ryabchikov Mikhail Yurievich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 298 558. E-mail: mr_mgn@mail.ru

Grebennikova Vera Vladimirovna – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 298 558. E-mail: greb1981@mail.ru

Ryabchikova Elena Sergeevna – Assistant Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: +7 (3519) 298 558. E-mail: mika.elena@mail.ru

Abstract. The paper analyses the prospects for the further operation control improvement in the centrifugal-type crushers manufactured by Ural-Omega CJSC in order to maximize their performance in maintaining the required quality of the product obtained at given engineering limitations of motor load. The use of a double-circuit dispensing control system for crushable materials to ensure their reasonable dispersal speed in the grinding chamber is suggested. The task of the system is the ability to control a crushing process under acting disturbances in the properties of raw materials, such as strength and moisture content, with operational control of product grade estimation on the proportion and flakiness of the various fractions.

Keywords: quality control, centrifugal crusher, grinding of metallic and non-metallic materials, dispensing control optimization.

References

1. Burnashev R.E. Upravlenie ustroystvom plavnogo puska ventilyatora tsentrobezhnoy drobilki po protokolu Modbus v usloviyakh ZAO "Ural-Omega" [The control of a centrifugal crusher fan soft starter in accordance with the Modbus protocol at Ural-Omega CJSC]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production]. 2013, no. 5, pp. 291–295.
2. Burnashev R.E., Ryabchikov M.Yu., Grebennikova V.V. Upravlenie rabotoy tsentrobezhnoy drobilki SS-0.36 s uchetom znacheniya koeffitsienta kreposti iskhodnogo materiala po metodu Protodyakonova [The CC 0.36 centrifugal crusher operation control taking into account the Protodyakonov hardness coefficient for raw material]. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production]. 2014, no. 6, pp. 203–208.
3. *Droblilka tsentrobezhnaya. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Centrifugal crusher. Operations Manual], SPA Minsk, 2013, 51 p.
4. *Konkurentnye preimushchestva drobilok Titan pri proizvodstve shchebnya. Rezhim dostupa* [The competitive advantages of Titan crushers in crushed stone production]. URL: <http://www.ntds.ru>.
5. Anikin P.M. *Avtomateskiy izmeritel leshchadnosti shchebnya* [Automatic gauge for crushed rock flakiness]. Patent RF, no. 68523, 2007.
6. Trufanov I.D., Lyutyi A.P. et al. Sistemnye faktory otsenki rabotosposobnosti elektrotekhnicheskikh kompleksov na osnove integrostokhasticheskikh kriteriev energoefektivnosti [System factors for electrical systems performance assessment on the basis of energy efficiency integral stochastic criteria]. *Vostochno-Evropayskiy zhurnal peredovykh tekhnologii* [Eastern - European Journal of Advanced Technologies], (48) 2010, pp. 46–58.
7. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Polko P.G., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Golovko N.A. Nchetkoe ekstremalnoe upravlenie protsessom izmelcheniya rudy dlya obespecheniya maksimalnoy proizvoditelnosti [Fuzzy extremal ore grinding process control in order to ensure maximum performance]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 65–69.
8. Ryabchikov M.Yu., Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Ryabchikova E.S., Golovko N.A., Polko P.G. Dostizhenie maksimalnoy proizvoditelnosti optimiziruемого protsesssa izmelcheniya rudy pri ispolzovanii printsipov nechetkogo ekstremalnogo upravleniya [The achievement of maximum performance for the optimized ore grinding process in utilizing the fuzzy extremal control principles]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 2, pp. 5–9.
9. Khopunov E.A. Selektivnoe razrushenie kak chastnyi sluchay dezinintegratsii rud [Selective destruction as a special case of ore disintegration]. *Obogashchenie rud* [Ore Dressing], 2010, no. 6, pp. 27–33.
10. Borokha E.L., Vorobyev V.V., Gorobets A.V. Tsentrobezhnye drobilki i melnitsy udarnogo tipa [Centrifugal crushers and impact grinding mills]. *Tsentrobezhnaya tekhnika – vysokie tekhnologii* [Centrifugal equipment - high technologies], 2008, pp. 5–16.