

УДК 621.926.5: 621.311.001.57

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Закамалдин Андрей Андреевич¹,
aaz5@tpu.ru

Перовощиков Филипп Владимирович²,
fvp2@tpu.ru

Шилин Александр Анатольевич²,
shilin@tpu.ru

¹ ООО «Электра+»,
Россия, 192288, г. Санкт-Петербург, ул. Малая Бухарестская, 6, к. 1, лит. А.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Шаровые мельницы широко применяются во многих отраслях промышленности для измельчения сыпучих материалов, а также на последних стадиях дробления руды, где достигаются необходимые размеры частиц для последующего обогащения. Несмотря на то, что шаровые мельницы имеют относительно простую конструкцию и были подвергнуты обширным исследованиям, промышленность все еще борется с очень низкой энергоэффективностью процесса измельчения. Поскольку модернизация тяжелого оборудования является затратным подходом, оптимизация процесса с помощью систем управления – наиболее предпочтительное решение для снижения энергопотребления. Как правило, для мельницы с постоянной скоростью вращения основным управляющим воздействием является производительность. Из-за недостаточной информативности, устаревших методов анализа и контроля внутренней динамики мельницы системы управления держат целевое значение производительности на заведомо низком уровне, чтобы не достичь перегрузки мельницы. В этой статье представлено объяснение того, как в таком случае могло бы повлиять повышение производительности мельницы на энергоэффективность измельчения, а именно на снижение энергопотребления.

Цель: исследование энергоэффективных режимов работы мельницы; проверка на модели и подтверждение на экспериментальных данных обратной зависимости между загрузкой мельницы и показателями электропотребления; формирование рекомендаций для энергоэффективного управления шаровой мельницей.

Объекты: процесс измельчения в шаровой мельнице с постоянной скоростью вращения.

Методы: математическое описание поведения электромеханической части машины переменного тока, работающей на нагрузку в виде шаровой мельницы; имитационное моделирование работы электропривода мельницы; статистический анализ энергетических показателей работы мельниц.

Результаты. Для шаровых мельниц с синхронным приводом 2500 кВт на основе моделирования и экспериментальных данных показана тенденция к увеличению потребления электроэнергии при уменьшении производительности, и наоборот, соответственно: при увеличении производительности в пределах 10–40 т/ч отмечается падение активной мощности на 0,48–1,57 %. Получены значения удельного расхода электроэнергии при измельчении апатитовой руды: ~5–8 кВт·ч/т. Увеличение производительности на 5 т/ч в среднем приводит к уменьшению удельных затрат электроэнергии на 0,12 кВт·ч/т. Повышать производительность при эксплуатации шаровых мельниц следует только после интеграции в систему управления мельницей средств измерений, которые позволяют делать точную оценку состояния загрузки барабана мельницы.

Ключевые слова:

обогащение полезных ископаемых, измельчение, шаровая мельница, загрузка мельницы, производительность, энергоэффективность, электропривод.

Введение

Характер протекания процесса измельчения, а именно движения шаровой загрузки и измельчаемого материала внутри барабана мельницы, является весьма сложным и динамичным. Попытки математически описать процесс ведутся на протяжении века, так, в 1933 г. была предложена первая базовая математическая модель для моделирования гранулометрического состава материалов [1]. Из-за сложности теоретического описания динамики измельчения в шаровой мельнице формулы тех или иных закономерностей получены эмпирически с рядом упрощений, некоторые из них:

1) кинематика движения загрузки мельницы – смеси шаров, руды, воды, построена на основе формул,

- описывающих движение шаров без учета движения измельчаемой среды или пульпы [2];
- 2) предполагается отсутствие скольжения шаров по футеровке мельницы и между слоями шаров [3];
 - 3) все частицы, взаимодействующие внутри мельницы, являются сферическими [4];
 - 4) процесс перемешивания внутри мельницы рассматривается как водопадный, хотя реальный процесс измельчения является реализацией смешанного режима – водопадного и каскадного [5] и др.

Количественная оценка не учитываемых в описании процесса факторов весьма затруднительна, поскольку процессы, происходящие при измельчении в мельнице, носят скорее случайный стохастический характер [3]. Многие характеристики остаются не-

объяснимыми, так, например, нет объяснения крайне низкому КПД измельчения [6].

Упрощенные математические модели в основном применяются для проектирования передела измельчения после лабораторных или полупромышленных исследований [7, 8]. К примеру, такие модели удобны в решении задачи, когда для заданной производительности Q , начальной d_n и конечной d_k крупности руды нужно определить диаметр D и длину L барабана мельницы, частоту ее вращения n , коэффициент заполнения шарами ϕ , вес шаров $G_{ш}$ и мощность двигателя $N_{дв}$. Таких моделей большое количество, и все в той или иной мере применимы в каком-то конкретном случае [7, 9, 10]. В мировой практике при проектировании цехов по подготовке руды к обогащению распространено использование технологии определения рабочего индекса шарового измельчения Бонда – BW_i , кВт·ч/т.

Однако для анализа протекания процесса измельчения в реальном времени эксплуатации применение приближенных теоретических моделей ограничено из-за значительных расхождений между расчетными и действительными показателями энергопотребления процесса измельчения, например, потребляемой полезной мощности электродвигателем главного привода (ЭДГП) мельницы [11, 12]. Как следствие их недостаточная информативность для применения в эффективных системах автоматического управления процесса измельчения [13].

Поэтому системы управления шаровыми мельницами зачастую ограничиваются датчиком, позволяющим лишь оценить динамику процесса, происходящего внутри мельницы. Выбору наилучшего параметра (-ов) для измерения и конструкции датчика посвящена отдельная тема в вопросе эффективной эксплуатации шаровой мельницы [14, 15]. Так или иначе, использование наиболее продвинутого метода, который позволяет делать более точную оценку состояния загрузки барабана мельницы, позволяет повысить производительность, а также эффективность использования электроэнергии [8, 16, 17]. В данной работе рассмотрено объяснение этого факта на основе имитационного моделирования и анализа архива данных эксплуатации шаровых мельниц с решеткой (МШР) с постоянной скоростью вращения.

Материалы и методы

Описание поведения электромеханической части машины переменного тока, работающей на нагрузку в виде шаровой мельницы, рассматривалось в [18–20]. Будем рассматривать уравнения системы K материальных точек и сил, действующих на них в поле силы тяжести. В качестве точки представим некую элементарную единицу сыпучего материала, находящегося в барабане мельницы.

Рассмотрим первый вариант загрузки полости барабана мельницы, когда количество обрабатываемого материала сравнительно небольшое (рис. 1).

Для формирования уравнений момента сил при такой компоновке системы разделим сечение барабана (рис. 1) на симметричные 4 части относительно его

центра. Таким образом, суммарный вектор силы для каждой из полуплоскостей по принципу суперпозиции имеет вид (1) [21]:

$$\begin{cases} \vec{F}_A = \sum_{j=1}^N \vec{F}_{A,j} = \vec{g} \sum_{j=1}^N m_{A,j}; \\ \vec{F}_B = \sum_{n=1}^M \vec{F}_{B,n} = \vec{g} \sum_{n=1}^M m_{B,n}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\vec{F}_A$, $\vec{F}_B$ – векторы сил, приложенные к точке А и В, Н; $\vec{F}_{A,j}$, $\vec{F}_{B,n}$ – «элементарные» силы, обусловленные взаимодействием N и M материальных точек с полем силы тяжести в левой и правой полуплоскости соответственно ($N+M=K$), Н; $m_{A,j}$, $m_{B,n}$ – массы «единицы» сыпучего материала в левой и правой полуплоскости, кг; $\vec{g}$ – ускорение свободного падения, м/с².

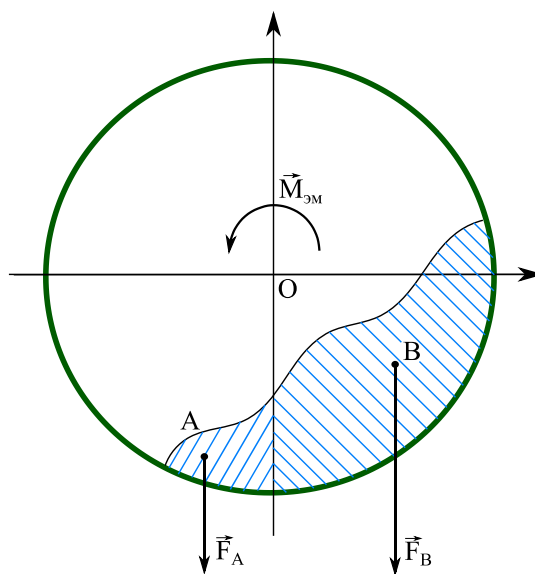


Рис. 1. Действие сил при частичной загрузке барабана шаровой мельницы

Fig. 1. Action of forces at partial loading of the ball mill drum

Таким образом, уравнение вращательного движения в статике в векторной форме примет вид:

$$\begin{aligned} \vec{M}_{эМ} = \vec{M}_{xx} + [\vec{r}_{B,O}, \vec{g}] \sum_{n=1}^M m_{B,j} - \\ - [\vec{r}_{A,O}, \vec{g}] \sum_{j=1}^N m_{A,j} = \vec{M}_{cl}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{M}_{xx}$ – момент холостого хода, создаваемый диссипативными силами, Н·м; $\vec{M}_{cl}$ – результирующий момент сопротивления при частичной загрузке, Н·м; $\vec{r}_{B,O}$, $\vec{r}_{A,O}$ – результирующие радиус-векторы к соответствующим центрам масс относительно точки О, м.

При такой конфигурации системы углы между радиус-векторами соответствующих масс подчиняются неравенству $\psi_1 < \psi_2$, где $\psi_1 = \angle \vec{r}_{A,O}, \vec{g}$; $\psi_2 = \angle \vec{r}_{B,O}, \vec{g}$. В таком случае $\sin \psi_1 < \sin \psi_2$, что и дает пару неском-

пенсированных сил тяжести и как результат – увеличенную разницу моментов сил тяжести и результирующего момента сопротивления в целом. Более того, повышенный вклад сыпучих масс, находящихся в правой полуплоскости, в значение результирующего момента также обусловлено тем, что $\sum_{n=1}^M m_{B,j} \gg \sum_{j=1}^N m_{A,j}$ в соответствии с (2). Таким образом, результирующий момент сопротивления при частичной загрузке формируется из момента потерь $\vec{M}_{xx}$ и разницы масс в объеме барабана $\vec{M}_{c1} \approx \vec{M}_{xx} + \Delta\vec{M}_{AB}$, где $\Delta\vec{M}_{AB}$ – разность моментов сил тяжести, Н·м.

Рассмотрим диаметрально противоположный случай, когда барабан заполнен практически полностью (рис. 2).

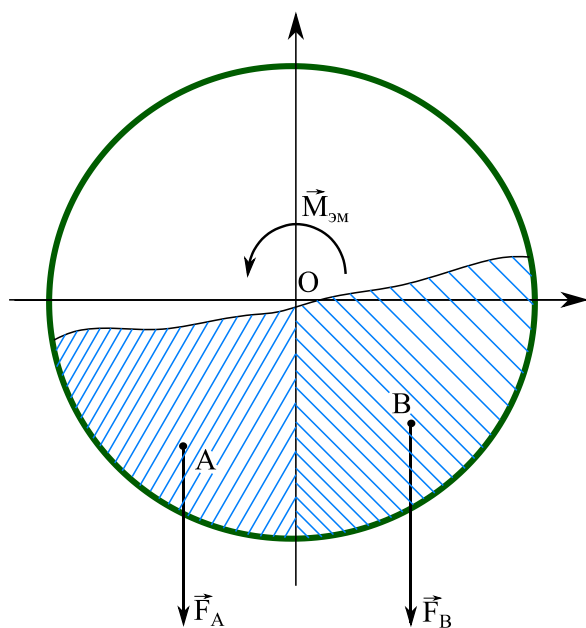


Рис. 2. Действие сил при полной загрузке барабана шаровой мельницы

Fig. 2. Action of forces at full loading of the ball mill drum

Уравнение (2), относящееся к системе с частичной загрузкой барабана (рис. 1), справедливо и для конфигурации системы с полной загрузкой барабана, представленной на рис. 2.

$$\vec{M}_{\text{эМ}} = \vec{M}_{xx} + [\vec{r}_{B,O}, \vec{g}] \sum_{n=1}^M m_{B,j} - [\vec{r}_{A,O}, \vec{g}] \sum_{j=1}^N m_{A,j} = \vec{M}_{c2}, \quad (3)$$

где $\vec{M}_{c2}$ – результирующий момент сопротивления при полной загрузке, Н·м.

Однако в таком случае $\sum_{n=1}^M m_{B,j} \approx \sum_{j=1}^N m_{A,j}$, что приводит к тому, что результирующий момент сопротивления определяется в значительной степени моментом холостого хода, при допущении о том, что векторные произведения $[\vec{r}_{B,O}, \vec{g}] \approx [\vec{r}_{A,O}, \vec{g}]$ при-

мерно равны. Иначе говоря, $\vec{M}_{c2} \approx \vec{M}_{xx}$ в соответствии с (3).

В динамике особый интерес представляет ударный момент, образующий переменную составляющую момента сопротивления, обусловленную «переваливанием» сыпучего материала. Таким образом, $|\text{grad}W_{p1}| > |\text{grad}W_{p2}|$, где W_{p1} и W_{p2} – потенциальные энергии переваливаемой части материала, Дж. Ввиду этого пульсации момента при частичной загрузке больше, чем при полной.

Помимо этого, функцией времени является момент инерции барабана мельницы, так как

$$J(t) = \sum_{j=1}^K (m_{d,j}(t) + m_{s,j}) \cdot r_j^2 = J_d(t) + J_s, \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где m_{dj} – перемещающаяся часть материала относительно барабана, кг; m_{sj} – статичная часть материала относительно барабана, кг; r_j^2 – квадрат радиус-вектора каждой элементарной единицы сыпучего материала, м².

Очевидно, что при большей загрузке, описанной во втором случае конфигурации системы, статический момент инерции существенно больше, чем в первом. Величину переменной части достоверно оценить нельзя, поэтому для моделирования примем ее равной для первого и второго случая при одинаковой сыпучести материала. Вследствие этого $J_2(t) \gg J_1(t)$ на всей области значений из-за его квадратичного роста.

Аппроксимировать зависимость момента сопротивления и момента инерции от времени по вышеприведенным выкладкам можно следующими функциями (4):

$$\begin{cases} M_c(t) = M_{xx} + M_0 + \Delta M f(t); \\ J(t) = J_{xx} + J_0 + \Delta J f(t), \end{cases} \quad (4)$$

где M_{xx} – момент сопротивления холостого хода, Н·м; J_{xx} – момент инерции холостого хода, кг·м²; M_0 – постоянная составляющая момента сопротивления, обусловленная загрузкой материала в барабан, Н·м; J_0 – постоянная составляющая момента инерции, обусловленная загрузкой материала в барабан, кг·м²; ΔM – амплитуда переменной составляющей момента сопротивления, созданная разницей масс груза в правой и левой полуплоскости барабана, Н·м; ΔJ – амплитуда переменной составляющей момента инерции, созданная разницей масс груза в правой и левой полуплоскости барабана, кг·м²; $f(t)$ – гладкая периодическая функция. Для дальнейших рассуждений примем, что для частичной и полной загрузки справедливы следующие соотношения $M_{xx,1} \approx M_{xx,2}$; $J_{xx,1} \approx J_{xx,2}$; $M_{0,1} \geq M_{0,2}$; $J_{0,1} \ll J_{0,2}$; $\Delta M_1 \geq \Delta M_2$; $\Delta J_1 \approx \Delta J_2$. Эти соотношения следуют из предположений:

- 1) $M_{xx,1} \approx M_{xx,2}$ – моменты сопротивления холостого хода, а именно моменты механических потерь в редукторе, подшипниках и т. п., постоянны в первом приближении вне зависимости от загрузки;
- 2) $J_{xx,1} \approx J_{xx,2}$ – моменты инерции холостого хода постоянны, так как геометрические размеры барабана и характеристики материала загрузки в процессе работы не изменяются;

- 3) $M_{0.1} \geq M_{0.2}$ – постоянная составляющая момента сопротивления в случае частичной загрузки больше из-за некомпенсированных пар сил тяжести, прикладываемых к барабану мельницы;
- 4) $J_{0.1} \ll J_{0.2}$ – момент инерции в первом случае существенно меньше по сравнению со случаем полной загрузки, так как общая масса загрузки материала в первом случае меньше;
- 5) $\Delta M_1 \geq \Delta M_2$ – ударные нагрузки в случае частичной загрузки будут больше ввиду того, что пространство барабана более пустое и переход потенциальной энергии переваливаемой части материала в кинетическую осуществляется в большей мере, чем при полной загрузке;
- 6) $\Delta J_1 \approx \Delta J_2$ – моменты инерции примерно равны в обоих случаях, поскольку предполагается, что увеличение массы загрузки материала увеличивает его объем и соответственно смещает центр масс ближе к оси мельницы, что компенсирует увеличение переменной составляющей момента инерции.

Модельные эксперименты проводились с асинхронным двигателем 4АМА71В8У3 и синхронным двигателем СДС 19-56-40. В качестве электромагнитной модели используются известные уравнения в двухфазной системе координат [22]. Управление силовым преобразователем ведется с помощью симплексной широтно-импульсной модуляции [23].

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику асинхронного двигателя в стационарной системе координат (5):

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{s\alpha} - R_e i_{s\alpha} + A_r K_r \psi_{r\alpha} + \omega_r K_r Z_p \psi_{r\beta}), \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_{s\beta} - R_e i_{s\beta} + A_r K_r \psi_{r\beta} - \omega_r K_r Z_p \psi_{r\alpha}), \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = K_r R_r i_{s\alpha} - A_r \psi_{r\alpha} - \omega_r Z_p \psi_{r\beta}, \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = K_r R_r i_{s\beta} - A_r \psi_{r\beta} + \omega_r Z_p \psi_{r\alpha}, \\ M_{эм} = \frac{3}{2} Z_p K_r (i_{s\beta} \psi_{r\alpha} - i_{s\alpha} \psi_{r\beta}), \\ \frac{2\pi}{60} \frac{d(J(t)n)}{dt} = M_{эм} - M_c(t), \end{cases} \quad (5)$$

где $U_{s\alpha}$ – составляющая напряжения статора по оси α , В; $U_{s\beta}$ – составляющая напряжения статора по оси β , В; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – составляющие тока статора, А; $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ – составляющие потокоцепления ротора, Вб; $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м; $M_c(t)$ – момент сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя, Н·м; $J(t)$ – приведенный момент инерции механизма к валу двигателя, кг·м²; Z_p – число пар полюсов, о.е.; ω_r – угловая скорость вращения двигателя, рад/с; $L_e = L_s - L_m^2/L$, $R_e = R_s + R_r K_r^2$, $A_r = R_r/L_r$, $K_r = L_m/L_r$ – коэффициенты, учитывающие параметры асинхронного двигателя; R_s – активное сопротивление обмотки статора, Ом; R_r – приведенное к обмотке статора активное сопро-

тивление обмотки ротора, Ом; L_m – полная индуктивность контура намагничивания, Гн; L_r – полная индуктивность обмотки ротора, Гн; L_s – полная индуктивность обмотки статора, Гн.

Система дифференциальных уравнений, описывающих динамику синхронного двигателя, также представлена ниже (6)

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{sd}}{dt} = U_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_r Z_p \psi_{sq}, \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} = U_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_r Z_p \psi_{sd}, \\ \frac{d\psi_f}{dt} = U_f - R_f i_f, \\ \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + M_{df} i_f, \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq}, \\ \psi_f = L_f i_f + M_{df} i_{sd}, \\ M_{эм} = \frac{3}{2} Z_p (i_{sq} \psi_{sd} - i_{sd} \psi_{sq}), \\ \frac{2\pi}{60} \frac{d(J(t)n)}{dt} = M_{эм} - M_c(t), \end{cases} \quad (6)$$

где U_{sd} – составляющая напряжения статора по оси d , В; U_{sq} – составляющая напряжения статора по оси q , В; U_f – напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения, В; i_{sd} , i_{sq} – составляющие тока статора, А; ψ_{sd} , ψ_{sq} – составляющие потокоцепления статора, Вб; ψ_f – потокоцепление обмотки возбуждения, Вб; i_f – ток обмотки возбуждения, А; $M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м; $M_c(t)$ – момент сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя, Н·м; $J(t)$ – приведенный момент инерции механизма к валу двигателя, кг·м²; Z_p – число пар полюсов, о.е.; ω_r – угловая скорость вращения двигателя, рад/с; L_{sd} , L_{sq} – индуктивность обмотки статора по осям d и q , Гн; M_{df} – коэффициент взаимной индукции между обмоткой возбуждения и обмоткой статора по оси d , Гн.

Результаты и их обсуждение

В результате моделирования получены следующие кривые угловой скорости барабана, фазных токов двигателя и потребляемой мощности при частичной и полной загрузке мельницы (рис. 3–6).

Из рисунков видно, что потребление электроэнергии при пониженной производительности мельницы (частичной загрузке) больше по сравнению с полной загрузкой барабана, как для асинхронного двигателя, так и для синхронного. Это можно легко объяснить тем, что увеличенный постоянный и переменный момент сопротивления, приложенный к валу электродвигателя, приводящего в движение барабан, создает в свою очередь повышенную постоянную и переменную составляющую среднеквадратичного значения фазного тока. Потребляемая электроприводом мощность определяется как

$$p(t) = \sum_{j=1}^3 \frac{U_j I_j}{2} (\cos(\varphi_j) - \cos(2\omega t - \varphi_j)),$$

где I_j – среднеквадратичное значения фазного тока, А; U_j – среднеквадратичное значения напряжения, В; $\cos(\varphi)$ – косинус сдвига фаз между соответствующими компонентами тока и напряжения. При бесконечной мощности сети по сравнению с потребляемой мощностью, напряжение можно считать постоянным. Тогда изменение величины мощности целиком и полностью определяется изменением фазного тока, что и ведет к увеличению потребления электроэнергии при уменьшении производительности, и наоборот, соответствен-

но. Период биений равен $T_6 = \frac{60}{n \cdot \zeta} = \frac{60}{12 \cdot 2} = 2,5$ с, что обусловлено «переваливанием» материала в барабане. Кратность биения ζ относительно частоты вращения барабана выбрана равной двум. Также стоит отметить, что в ходе модельных экспериментов установлено, что среднее значение потребляемой мощности слабо зависит от величины кратности.

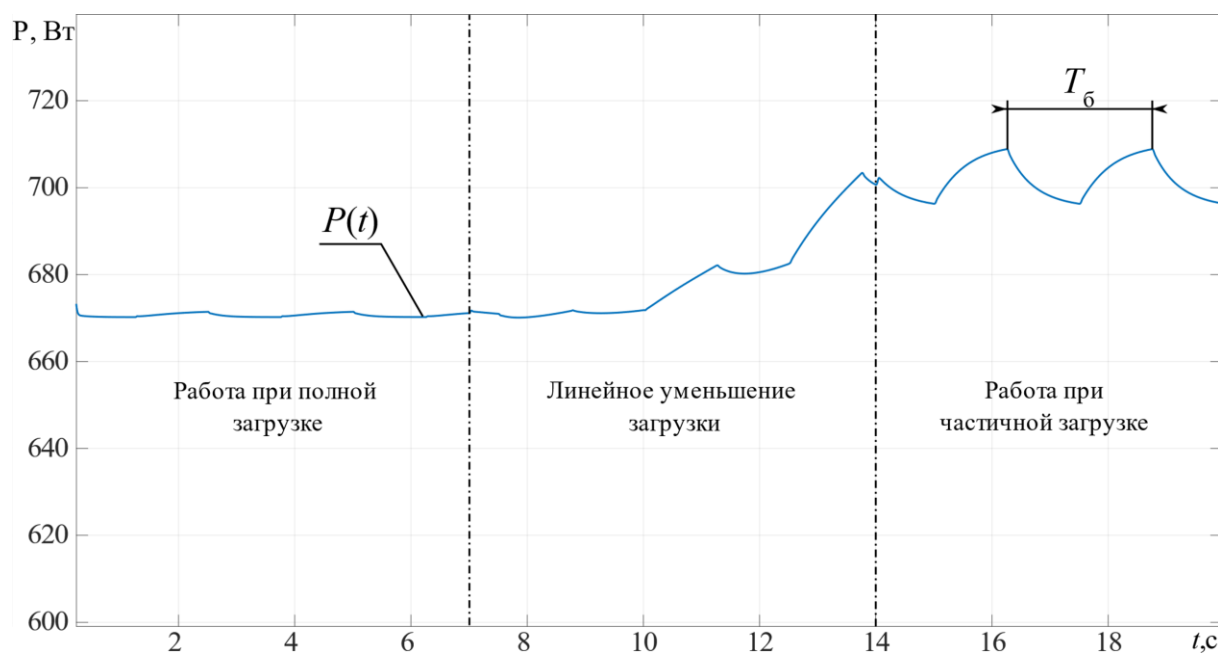


Рис. 3. Динамика изменения потребляемой мощности асинхронным двигателем при изменении производительности мельницы

Fig. 3. Dynamics of change in power consumption by an asynchronous motor with a change in the productivity of the mill

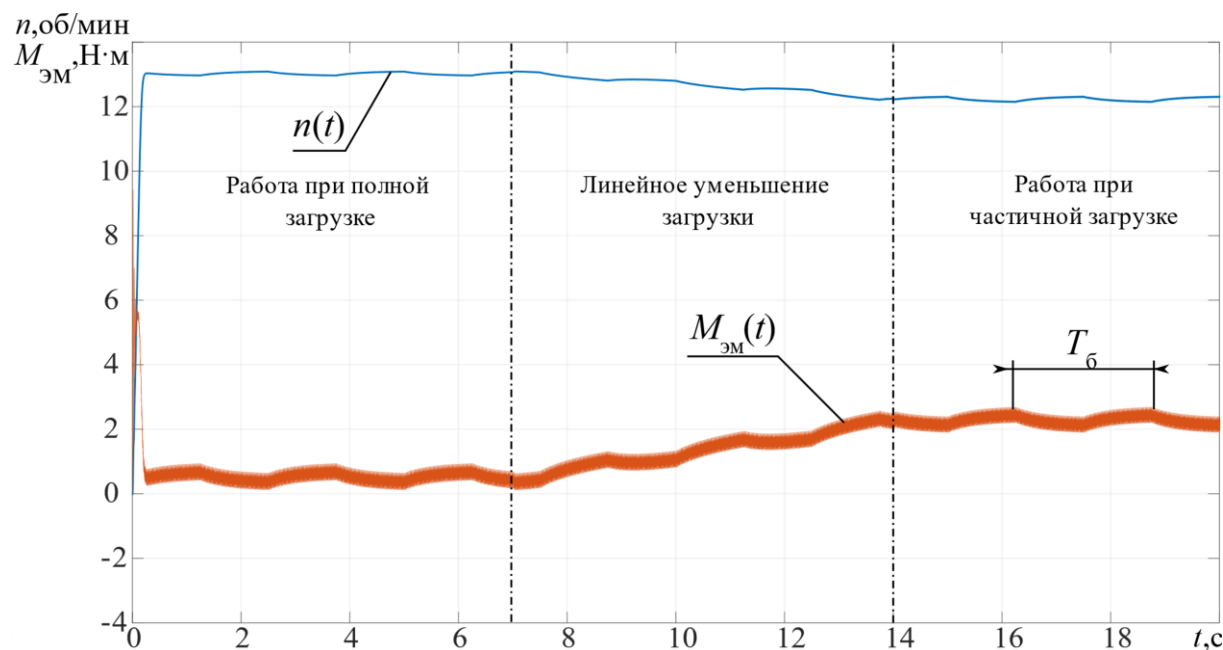


Рис. 4. Динамика изменения частоты вращения барабана и электромагнитного момента асинхронного двигателя

Fig. 4. Dynamics of change in drum speed and electromagnetic torque of asynchronous motor

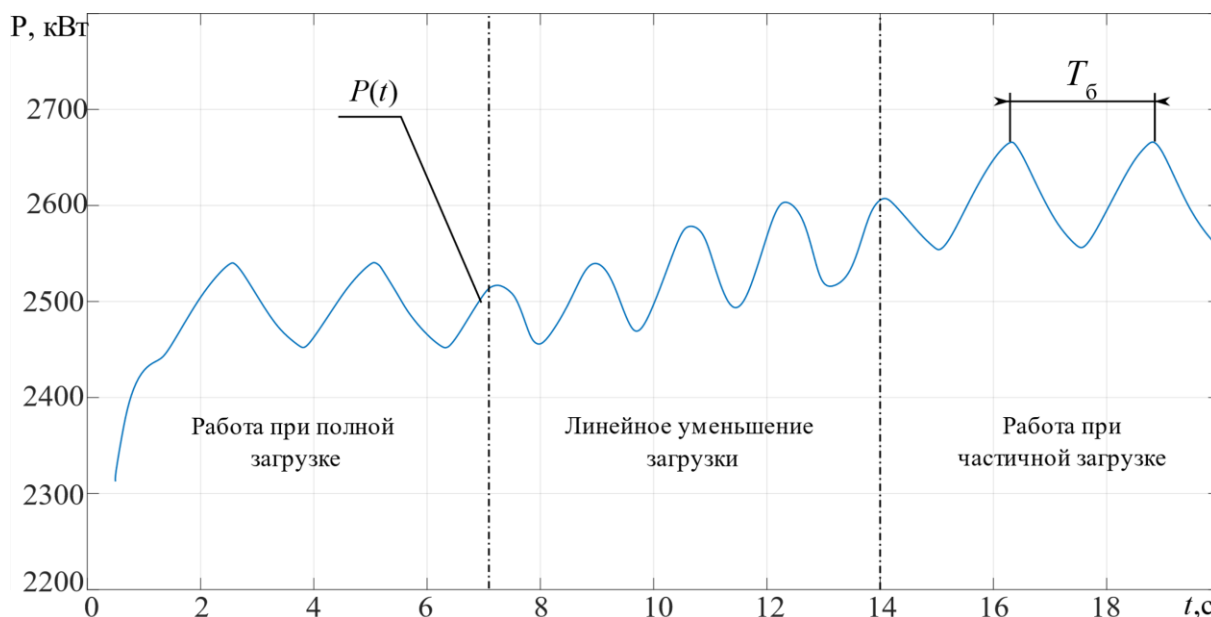


Рис. 5. Динамика изменения потребляемой мощности синхронным двигателем при изменении производительности мельницы

Fig. 5. Dynamics of change in power consumption by a synchronous motor with a change in the productivity of the mill

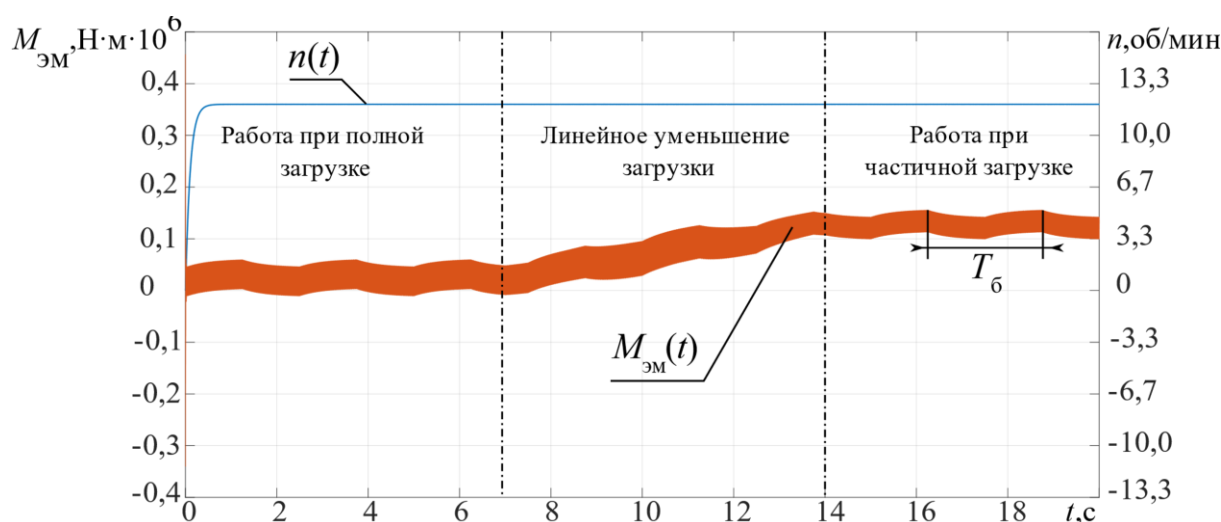


Рис. 6. Динамика изменения частоты вращения барабана и электромагнитного момента синхронного двигателя

Fig. 6. Dynamics of change in drum speed and electromagnetic torque of a synchronous motor

Аналогичные выводы можно сделать по данным (рис. 7), снятым в процессе эксплуатации мельниц МШР с синхронным двигателем СДС 19-56-40 мощностью 2500 кВт.

В табл. 1 приведены результаты анализа трендов (рис. 7). Поскольку активная мощность N масштабируется в пределах полезного для системы управления диапазона, реальные значения активной мощности N_r получены обратным масштабированием.

Таблица 1. Результаты анализа трендов производительности и активной мощности шаровых мельниц с решеткой
Table 1. Analysis results of active power and feed rate trends for grate ball mills

Рис. Fig.	N _{min}	N _{max}	ΔN	K1	K2	N _{rmin}	N _{rmax}	ΔNr	Q _{min}	Q _{max}	ΔQ	Δt, ч
	%					%			т/ч/t/h			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7, а	29,03	33,97	4,94	53,7	4,5	60,15	61,25	−1,10	190	205	15	12
7, б	32,35	39,41	7,06	53,7	4,5	60,89	62,46	−1,57	195	220	25	8
7, в	24,25	32,28	8,03	41,5	6	45,54	46,88	−1,34	225	235	10	30
7, г	26,65	36,64	10,01	49,5	7	53,31	54,74	−1,43	230	250	20	30
7, д	41,51	44,9	3,39	49,5	7	55,43	55,91	−0,48	190	231	40	8

Примечание: формулы расчета по столбцам (4)=(3)–(2); (7)=(2)/(6)+(5); (8)=(3)/(6)+(5); (9)=(7)–(8); (12)=(11)–(10).
Note: formulas of calculation by columns: (4)=(3)–(2); (7)=(2)/(6)+(5); (8)=(3)/(6)+(5); (9)=(7)–(8); (12)=(11)–(10).

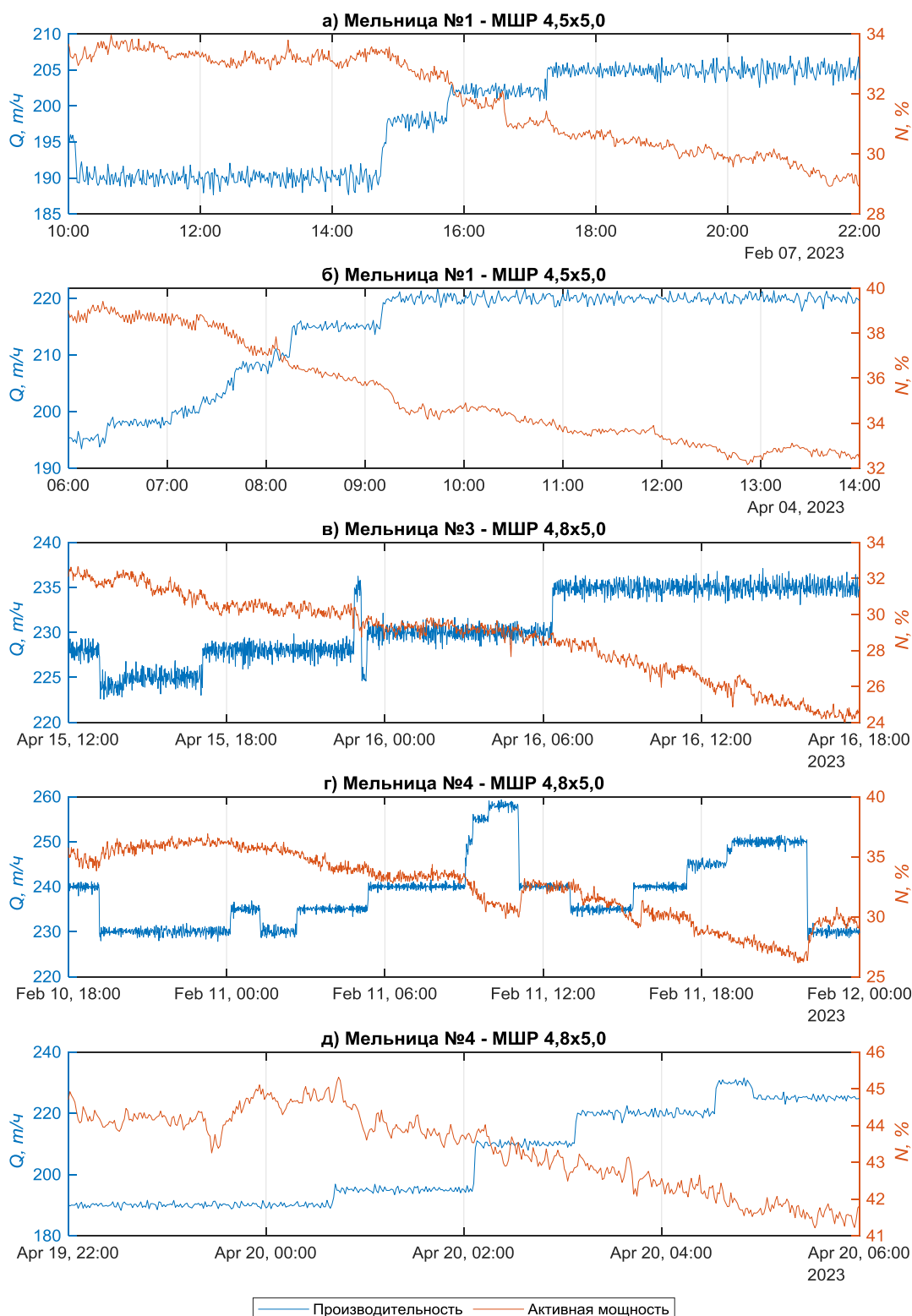


Рис. 7. Выборка трендов производительности и активной мощности трех шаровых мельниц с решеткой, демонстрирующая изменение активной мощности ЭДГП при повышении производительности по руде: а, б) мельница № 1 (МШР 4,5×5,0); в) мельница № 3 (МШР 4,8×5,0); г, д) мельница № 4 (МШР 4,8×5,0)

Fig. 7. Sample of feed rate and active power trends of three grate ball mills showing the behavior of active power of drive with increasing ore feed rate: а, б) 4,5×5,0 grate mill no. 1; в) 4,8×5,0 grate mill no. 3; г, д) 4,8×5,0 grate mill no. 4

Таким образом, на данных интервалах наблюдения при повышении производительности в пределах 10–40 т/ч падение активной мощности составило 0,48–1,57 %, что соответствует 11,6–37,7 кВт.

В практике оценки эффективности электропотребления применяются расчетно-статистические методы анализа энерготехнологических показателей [17]:

$$w = \frac{W}{Q}, \quad (7)$$

где w – удельный расход электроэнергии на тонну руды, кВт·ч/т; W – расход электроэнергии ЭДГП мельницы за минуту, кВт·ч/мин; Q – производительность мельницы по руде за минуту, т/мин.

На рис. 8 приведены результаты расчетно-статистического анализа удельного расхода электроэнергии на тонну руды (7) в зависимости от эксплуатации мельниц МШР с постоянной скоростью вращения при различных диапазонах производительности.

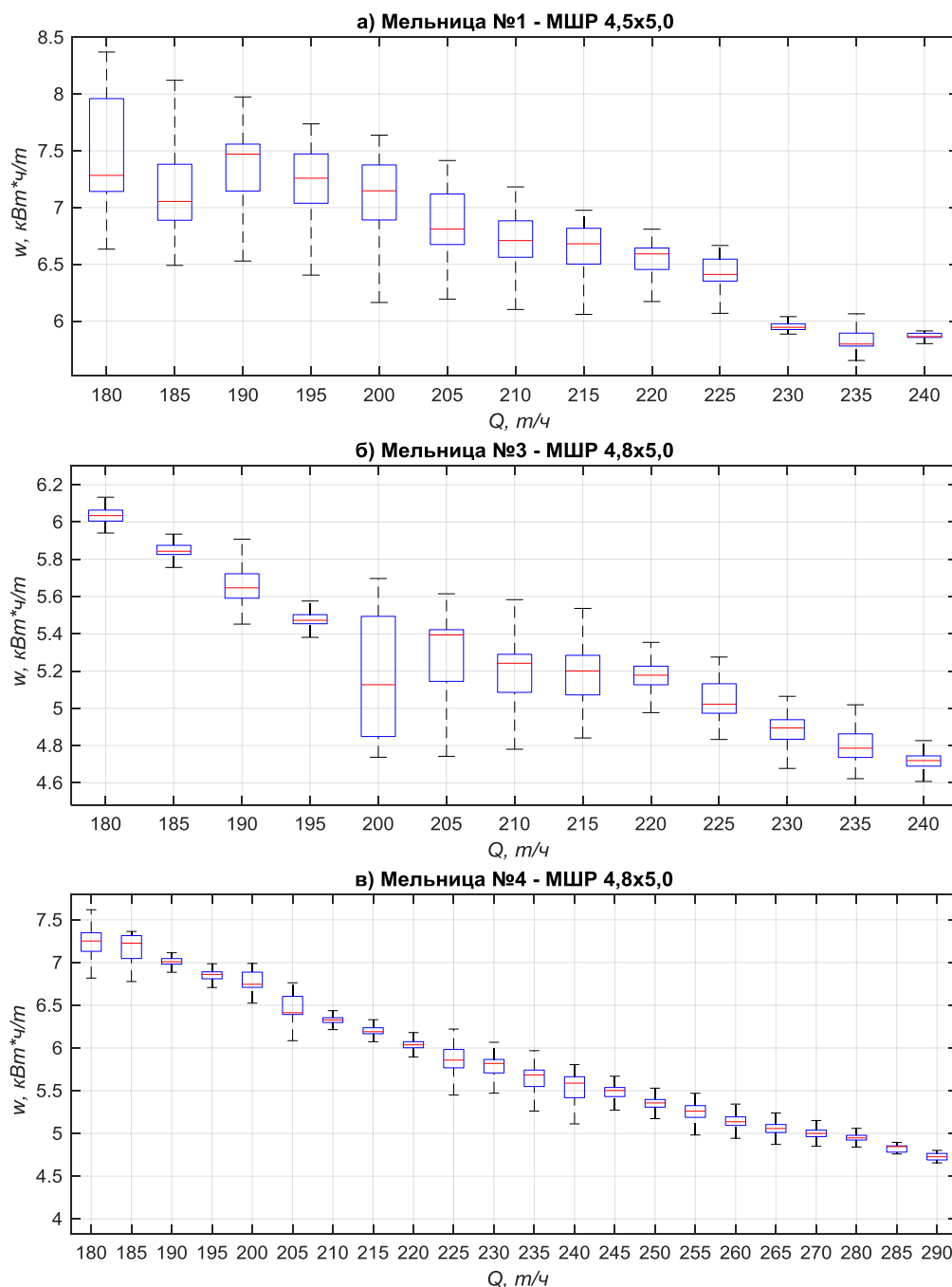


Рис. 8. Блочные диаграммы зависимостей удельного потребления электроэнергии тремя мельницами МШР при различных диапазонах ($\pm 2,5$ т/ч) производительности по руде, наблюдаемых с периодом 1 минута за время работы: а) 66 дней; б) 24 дня; в) 77 дней; для каждого диапазона производительности отображаются: медиана, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальные значения удельного потребления электроэнергии

Fig. 8. Block diagrams of dependences of specific power consumption by three grate ball mills at different ranges ($\pm 2,5$ t/h) of ore feed rate, observed with a period of 1 minute during operation: а) 66 days; б) 24 days; в) 77 days; for each performance range displays: median, lower and upper quartiles, minimum and maximum values of specific energy consumption

Таблица 2. Результаты расчетно-статистического анализа зависимости удельного расхода электроэнергии на тонну руды (медианные значения, кВт·ч/т) от производительности мельниц МШР

Table 2. Results of the statistical analysis of the dependence of the specific power consumption per ton (median values, kWh/t) of ore on the feed rate of grate ball mills

Рис. Fig.	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235	240
	т/ч/т/ч												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
8, а	7,28	7,05	7,47	7,26	7,15	6,81	6,71	6,68	6,59	6,41	5,94	5,80	5,86
8, б	6,03	5,84	5,65	5,47	5,13	5,39	5,24	5,20	5,18	5,02	4,89	4,79	4,72
8, в	7,25	7,23	7,01	6,86	6,75	6,41	6,33	6,19	6,04	5,86	5,82	5,68	5,59

В табл. 2 приведены результаты расчетно-статистического анализа (рис. 8). Анализ показал, что повышение производительности на 5 т/ч в среднем приводит к уменьшению удельных затрат электроэнергии на 0,12 кВт·ч/т; повышение производительности на 60 т/ч привело к уменьшению удельных затрат электроэнергии на 1,42; 1,31; 1,66 кВт·ч/т соответственно для мельниц № 1, 3, 4. Подобные тенденции и статистические связи были получены в работах [8, 17, 24, 25].

Может ли это являться основанием для рекомендаций по оптимальной эксплуатации шаровых мельниц? Не совсем, поскольку просто поднятие производительности без учета других эксплуатационных характеристик мельницы может привести к нежелательным последствиям, например, к перегрузке мельницы.

Тогда, учитывая то, что качество измельчения должно сохраняться, оптимальная эксплуатация шаровых мельниц сводится к решению задачи условной оптимизации:

$$w \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$quality = \text{const.} \quad (9)$$

Решение задачи оптимизации (8) определяется как набор управляющих воздействий, характеризующихся функциями времени, таких как: скорость вращения мельницы ω , объемное заполнение мельницы шарами ϕ , размер шаров, расход воды Q_w , расход руды в мельницу Q (производительность).

Для мельницы, работающей в водопадном режиме, с постоянной скоростью вращения:

$$\omega = \text{const, рад / с.} \quad (10)$$

В процессе эксплуатации мельницы шары изнашиваются и коэффициент шаровой загрузки мельницы ϕ должен поддерживаться на одном определенном значении путем добавления в мельницу новых шаров. Существуют системы управления дозированием шаров, которые позволяют обеспечить большую стабильность шаровой загрузки, по сравнению с ручной загрузкой, тогда:

$$\phi = \text{const, д. ед.} \quad (11)$$

При мокром измельчении в мельницу вместе с рудой Q подается вода Q_w и поддерживается в оптимальном соотношении «руда–вода» [26]. То есть расход воды является функцией от расхода руды:

$$Q_w = f(Q), \text{ м}^3 / \text{ч.} \quad (12)$$

Выполнение условия (9) можно охарактеризовать как задачу максимально быстрого получения из ис-

ходного сырья зерен целевого класса крупности, который требуется на последующем этапе обогащения. Но без создания оптимальных условий для измельчения в шаровой мельнице скорость получения частиц нужного размера из исходного сырья будет низкой, следовательно, на выходе из мельницы будут преобладать слишком крупные частицы. На основании модели [27] скорость измельчения, во-первых, зависит от свойств руды: исходного гранулометрического состава, среднего диаметра зерна каждой размерной фракции, плотности рудных зерен, твердости; во-вторых, от параметров мельницы: рабочий диаметр, угловая скорость вращения, диаметр шара, масса шаровой загрузки, плотность материала шаров; в-третьих, от текущей загрузки мельницы рудой и водой. Исходя из (10)–(12) и того, что в процессе эксплуатации управлять свойствами руды и параметрами мельницы невозможно, для высокого качества измельчения нужно обеспечить оптимальную загрузку мельницы рудой и водой:

$$quality = f(Q_w, Q) = f(Q).$$

Таким образом, управляющее воздействие на процесс измельчения в шаровой мельнице с постоянной скоростью вращения всего одно – производительность Q . Решение задачи эффективного управления мельницей (8) сводится к управлению производительностью мельницы, чтобы удельное потребление электроэнергии ЭДГП было минимальным. Несмотря на это, задача (8) является весьма нетривиальной из-за ряда факторов, которые стоит учитывать [28–30], чтобы мельница была загружена материалом на оптимальном уровне – не недогружена и не перегружена. Поэтому использование наиболее продвинутого метода, который позволяет делать более точную оценку состояния загрузки барабана мельницы, позволяет повысить производительность, а также эффективность использования электроэнергии.

Выводы

Проведено исследование энергоэффективных режимов работы мельницы методом имитационного моделирования динамики изменения частоты вращения барабана шаровой мельницы, потребляемой мощности и электромагнитного момента асинхронного и синхронного двигателя. Результаты моделирования показали тенденцию к увеличению потребления электроэнергии при уменьшении производительности и наоборот соответственно. Проверка на экспериментальных данных показала, что в динамике при увеличении производительности в пределах 10–40 т/ч от-

мечается падение активной мощности на 0,48–1,57 %. Экспериментальные данные были получены при эксплуатации шаровых мельниц с решеткой с постоянной скоростью вращения с синхронным двигателем мощностью 2500 кВт на стадии измельчения апатитовой руды перед флотацией. Также после анализа данных получены значения удельного расхода электроэнергии при измельчении апатитовой руды, которые составляют ~5–8 кВт·ч/т. Анализ статистической связи между удельным расходом электроэнергии и количеством перерабатываемой руды показал, что увели-

чение производительности на 5 т/ч в среднем приводит к уменьшению удельных затрат электроэнергии на 0,12 кВт·ч/т. Тем самым показано наличие обратной зависимости между загрузкой мельницы и показателями электропотребления. Тем не менее рекомендовать повышать производительность при эксплуатации шаровых мельниц следует только после интеграции в систему управления мельницей средств измерений, которые позволяют делать точную оценку состояния загрузки барабана мельницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosin P. Laws governing the fineness of powdered coal // *Journal of Institute of Fuel*. – 1933. – V. 7. – P. 29–36.
2. Зюбровский Л.Г. Исследование энергетики процесса измельчения руды в шаровых мельницах и методы повышения эффективности использования электроэнергии рудообогатительными фабриками: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 1983. – 224 с.
3. Вероятностная модель измельчения материалов как оператор самоорганизации и аттрактор процесса / В.П. Малышев, Н.С. Бектурганов, А.М. Макашева, Ю.С. Зубрина // *Цветные металлы*. – 2016. – № 2. – С. 33–39.
4. Жуковский Ю.Л., Королев Н.А., Малькова Я.М. Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // *Записки Горного института*. – 2022. – Т. 256. – С. 686–700.
5. Ястребов К.Л., Николаев М.Д. Расчет мощности, потребляемой барабанными мельницами // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2015. – № 4 (48). – С. 56–59.
6. Кузнецова М.М., Ведь В.Е. Теоретические и экспериментальные исследования энергоэффективного процесса измельчения цементного клинкера в шаровой мельнице // *Проблемы региональной энергетики*. – 2014. – № 2 (25). – С. 93–97.
7. Читалов Л.С., Львов В.В. Сравнительная оценка методов определения рабочего индекса шарового измельчения бонда // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2021. – № 1. – С. 130–145.
8. Soares A., Almeida J. Multi-compartment rod/ball mill evaluation on bauxite operation // *Procemin geomet*. – 2019. – P. 1–8.
9. Chehrehghani S., Gharehgheshlagh H.H., Haghikia S. Power consumption management and simulation of optimized operational conditions of ball mills using the Morrell Power model: a case study // *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. – 2022. – V. 38. – № 2. – P. 123–135.
10. Variability of the ball mill bond's standard test in a ta ore due to the lack of standardization / G.G. García, A.L. Coello-Velázquez, B.F. Pérez, J.M. Menéndez-Aguado // *Metals*. – 2021. – V. 11. – № 10:1606. – P. 1–7.
11. Golpayegani M.H., Rezai B. Modelling the power draw of tumbling mills: a comprehensive review // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. – 2022. – V. 58. – № 4. – P. 151600.
12. Ханин С.И., Ханзаров А.С. Анализ математических моделей процесса измельчения материала в шаровых барабанных мельницах // *Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов*. – 2020. – № 19. – С. 306–311.
13. Казаринов Л.С., Хасанов Д.Р. Оптимизации степени загрузки мельницы при производстве цемента // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2019. – № 30. – С. 196–210.
14. Increasing energy efficiency and productivity of the comminution process in tumbling mills by indirect measurements of internal dynamics – an overview / M. Góralczyk, P. Krot, R. Zimroz, S. Ogo-powski // *Energies*. – 2020. – V. 13. – № 24:6735. – P. 1–19.
15. Ханин С.И., Мордовская О.С., Ханзаров А.С. Анализ методов прямого контроля внутримельничного заполнения шаровых барабанных мельниц // *Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии*. – 2021. – № 1. – С. 141–146.
16. Normanyo E., Ofosu R.A. The effects of temperature, vibration and dosage on the mill motor efficiency of cement grinding ball mills // *Ghana Journal of Technology*. – 2021. – T. 6. – № 1. – P. 9–17.
17. Пичуев А.В., Павлов Е.Б. Исследование процесса электропотребления шаровой мельницы // *Наукофсфера*. – 2021. – № 4-1. – С. 182–188.
18. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems / P. Bortnowski, L. Gladysiewicz, R. Król, M. Ozdoba // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 6:1786. – P. 1–14.
19. Xu Y., Zhang B., Feng G. Research on efficiency optimal torque distribution of stator module combined permanent magnet synchronous machine // *IET Electric Power Applications*. – 2022. – V. 16. – № 2. – P. 236–247.
20. Assessment of effect of lining material on energy efficiency of starting up ball mills / K. Muratov, O. Ishnazarov, A. Isakov, I. Nuritov // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2023. – V. 365. – P. 04005.
21. Бать М.И., Джанелидзе Г.Ю., Кельзон А.С. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т. 1: Статика и кинематика. 12-е изд., стер. – СПб: Лань, 2013. – 672 с.
22. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: ИД МЭИ, 2015. – 373 с.
23. Охоткин Г.П., Иванчин И.И. Способ векторной широтно-импульсной модуляции в многоуровневом преобразователе напряжения // *Вестник Чувашского университета*. – 2022. – № 1. – С. 107–114.
24. Ключев Р.В., Гаврина О.А., Михальченко С.Н. Анализ удельного потребления электроэнергии обогатительной фабрики // *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. – 2020. – № 1. – С. 433–447.
25. Энергетическая оценка процесса измельчения кусковых материалов / М.Б. Балданов, Ю.А. Сергеев, Д.Б. Лабаров, Ц.И. Гармаев // *Вестник Саратовского государственного технического университета/Вестник ВСГТУ*. – 2019. – Т. 73. – № 2. – С. 57–63.
26. Wills B.A., Finch J. Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. – Elsevier, 2015. – 496 p.
27. Случайная природа и вероятностная модель измельчения материалов / В.П. Малышев, А.М. Макашева, Н.С. Бектурганов, Д.А. Кайкенов. – М.: Научный мир, 2017. – 260 с.
28. Nkomo F., Mulenga F.K. Assessing the effects of material properties on load behavior in dry ball mills using DEM // *Conference on Multidisciplinary Research (MyRes)*. – Balaclava, Mauritius, 2022. – P. 253.
29. Minin I., Dedyalkov P., Savov S. Research of the charge load influence over the tumbling mill characteristics through general utility function // *J. Chem. Metall.* – 2021. – V. 56. – P. 819–826.
30. AmanNejad M., Barani K. Effects of ball size distribution and mill speed and their interactions on ball milling using DEM // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2021. – V. 42. – № 6. – P. 374–379.

Поступила: 30.05.2023 г.

Прошла рецензирование: 29.08.2023 г.

Информация об авторах

Закамалдин А.А., главный специалист по автоматизации ООО «Электра+».

Перовоциков Ф.В., аспирант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шилин А.А., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.926.5:621.311.001.57

EFFICIENT USE OF ELECTRIC ENERGY WHEN OPERATING A BALL MILL WITH A CONSTANT ROTATION SPEED

Andrei A. Zakamaldin¹,
aaz5@tpu.ru

Filipp V. Perevoshchikov²,
fvp2@tpu.ru

Aleksandr A. Shilin²,
shilin@tpu.ru

¹ «Electra+» Ltd,
6, bld. 1, A, Malaya Bukharetskaya street, Saint Petersburg, 195251, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. Ball mills are widely used in industry for grinding bulk materials, as well as in the last stages of ore crushing, where the required optimal particle sizes are achieved for enrichment. Although ball mills have a relatively simple design and cover extensive research, the industry is still struggling with the very low energy efficiency of the grinding process. As the retrofitting heavy equipment is the costliest approach, process optimization through control system is the most suitable for energy consumption reduction. As a rule, the feed rate is the main control variable for a mill with a constant rotation speed. Due to insufficient information content, outdated methods of analysis and control of the internal dynamics of the mill, control systems keep the target value of feed rate at a deliberately low level in order not to overload the mill. This article provides an explanation of how, in such a case, an increase in mill feed rate could affect the energy efficiency of grinding.

The main aim: study of energy efficient modes of operation of stations; verification of models and confirmation of experimental data: the relationship between door loading and power consumption indicators; construction of buildings for energy efficient control of ball towers.

Objects: the process of grinding in a ball tower with a constant rotation speed.

Methods: mathematical description of the behavior of the electromechanical part of a machine that consumes current and works on a load in the form of spherical furniture; simulation modeling of the operation of the door electric drive; statistical analysis of production indicators.

Results. The paper demonstrate the tendency to increase electricity consumption with a decrease in feed rate and vice versa, respectively for ball mills with a synchronous drive of 2500 kW based on modeling and experimental data. Increase in feed rate in the range of 10–40 t/h, there is a drop in active power by 0.48–1.57 %. The values of the specific power consumption of ~5–8 kWh/t during the grinding of apatite ore were obtained. An increase in productivity by 5 t/h on average leads to a decrease in the specific power consumption by 0.12 kWh/t. It is necessary to increase productivity in the operation of ball mills only after integrating measuring instruments into the control system of the mill, which allow an accurate assessment of the state of loading of the mill drum.

Key words:

mineral processing, grinding, ball mill, mill loading, productivity, energy efficiency, electric drive.

REFERENCES

- Rosin P. Laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of Institute of Fuel*, 1933, vol. 7, pp. 29–36.
- Zyubrovsky L.G. *Issledovanie energetiki protsessa izmelcheniya rudy v sharovykh melnitsakh i metody povysheniya effektivnosti ispolzovaniya elektroenergii rudoobogatitelnyimi fabrikami*. Dis. Kand. nauk [Investigation of the energetics of ore grinding in ball mills and methods for increasing the efficiency of using electricity by ore-dressing plants. Cand. Diss.]. Novocherkassk, 1983. 224 p.
- Malyshev V.P., Bekturganov N.S., Makasheva A.M., Zubrina Yu.S. Probabilistic model of material grinding as an operator of self-organization and an attractor of the process. *Non-ferrous metals*, 2016, no. 2, pp. 33–39. In Rus.
- Zhukovsky Yu.L., Korolev N.A., Malkova Ya.M. Monitoring the state of grinding in drum mills by the resulting moment on the shaft. *Journal of Mining Institute*, 2022, no. 256, pp. 686–700. In Rus.
- Yastrebov K.L., Nikolaev M.D. Calculation of the power consumed by drum mills. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2012, no. 4 (48), pp. 56–59. In Rus.
- Kuznetsova M.M., Ved V.E. Theoretical and experimental studies of the energy-efficient grinding process of cement clinker in a ball mill. *Problems of the Regional Energetics*, 2014, no. 2 (25), pp. 93–97. In Rus.
- Chitalov L.S., Lvov V.V. Comparative assessment of the Bond Ball Mill Work Index tests. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2021, no. 1, pp. 130–145. In Rus.
- Soares A., Almeida J. Multi-compartment rod/ball mill evaluation on bauxite operation. *Procemin geomet.*, 2019, no. 1, pp. 1–8.
- Chehrehgani S., Gharegheshlagh H.H., Haghikia S. Power consumption management and simulation of optimized operational conditions of ball mills using the Morrell Power model: a case study. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 2022, vol. 38, no. 2, pp. 123–135.
- García G.G., Coello-Velázquez A.L., Pérez B.F., Menéndez-Aguado J.M. Variability of the ball mill bond's standard test in a ta ore due to the lack of standardization. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 10:1606, pp. 1–7.
- Golpayegani M.H., Rezai B. Modelling the power draw of tumbling mills: a comprehensive review. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2022, vol. 58, no. 4, p. 151600.
- Khanin S.I., Khanzarov A.S. Analysis of mathematical models of material grinding process in ball drum mills. *Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials*, 2020, no. 19, pp. 306–311. In Rus.
- Kazarinov L.S., Khasanov D.R. Optimization of the mill load degree in cement production. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*, 2019, no. 30, pp. 196–210. In Rus.

14. Góralczyk M., Krot P., Zimroz R., Ogonowski S. Increasing energy efficiency and productivity of the comminution process in tumbling mills by indirect measurements of internal dynamics – an overview. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 24:6735, pp. 1–19.
15. Hanin S.I., Mordovskaya O.S., Hanzarov A.S. Analysis of methods for direct control of in-mill filling of ball drum mills. *Machines, aggregates and processes in the construction industry*, 2021, no. 1, pp. 141–146. In Rus.
16. Normanyo E., Ofosu R.A. The effects of temperature, vibration and dosage on the mill motor efficiency of cement grinding ball mills. *Ghana Journal of Technology*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 9–17.
17. Pichuev A.V., Pavlov E.B. Study of the power consumption process of a ball mill. *Naukosfera*, 2021, no. 4-1, pp. 182–188. In Rus.
18. Bortnowski P., Gładysiewicz L., Król R., Ozdoba M. Energy efficiency analysis of copper ore ball mill drive systems. *Energies*, 2021, no. 14, no. 6:1768, pp. 1–14.
19. Xu Y., Zhang B., Feng G. Research on efficiency optimal torque distribution of stator module combined permanent magnet synchronous machine. *IET Electric Power Applications*, 2022, vol. 16, no. 2, pp. 236–247.
20. Muratov K., Ishnazarov O., Isakov A., Nuritov I. Assessment of effect of lining material on energy efficiency of starting up ball mills. *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*, 2023, vol. 365, 04005 p.
21. Bat M.I., Dzhaneldidze G.Yu., Kelzon A.S. *Teoreticheskaya mekhanika v primerakh i zadachakh. T. 1: Statika i kinematika* [Theoretical mechanics in examples and problems. Vol. 1: Statics and Kinematics]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2012. 672 p.
22. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]. Moscow, MEI Publ. house, 2015. 373 p.
23. Okhotkin G.P., Ivanchin I.I. The method of vector pulse-width modulation in a multilevel voltage converter. *Bulletin of the Chuvash University*, 2022, no. 1, pp. 107–114. In Rus.
24. Klyuev R.V., Gavrina O.A., Mihalchenko S.N. Analysis of the specific electricity consumption of the processing plant. *Bulletin of the South Ural State University*, 2020, no. 1, pp. 433–447. In Rus.
25. Baldanov M.B., Sergeev Yu.A., Labarov D.B., Garmaev C.I. Energy assessment of the process of grinding lumpy materials. *Bulletin of the East Siberian State University of Technology/Vestnik VSGTU*, 2019, no. 2, pp. 57–63. In Rus.
26. Wills B.A., Finch J. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Elsevier, 2015. 496 p.
27. Malyshev V.P., Makasheva A.M., Bekturganov N.S., Kaikenov D.A. *Sluchaynaya priroda, veroyatnostnaya model i samoorganizatsiya protsessov pri izmelchenii materialov* [Random nature, probabilistic model and self-organization of the process during grinding of materials]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2017. 123 p.
28. Nkomo F., Mulenga F.K. Assessing the effects of material properties on load behavior in dry ball mills using DEM. *Conference on Multidisciplinary Research (MyRes)*. Balaclava, Mauritius, 2022. 253 p.
29. Minin I., Dedyalkov P., Savov S. Research of the charge load influence over the tumbling mill characteristics through general utility function. *J. Chem. Metall.*, 2021, vol. 56, pp. 819–826.
30. AmanNejad M., Barani K. Effects of ball size distribution and mill speed and their interactions on ball milling using DEM. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2021, vol. 42, no. 6, pp. 374–379.

Received: 30 May 2023.

Reviewed: 29 August 2023.

Information about the authors

Andrei A. Zakamaldin, chief specialist in automation, «Electra+» Ltd.

Filipp V. Perevoshchikov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Aleksandr A. Shilin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.