

ФОРМИРОВАНИЕ ФАКТОРНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДРОБИЛЬНО- ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

*В. П. Розен, В. П. Калинин, кандидаты техн. наук, А. В. Мейта, асп.
(НТУУ «КПИ»)*

Описано факторное поле одного из элементов дробильно-измельчительного комплекса – мельницы. Структура поля представляет собой четыре группы факторов, которые описывают контролируемые, регулирующие воздействия и величины, характеризующие оборудование и измельчаемый материал. На основании данных о работе объектов измельчающего комплекса приведен расчет периода дискретизации для получения численных характеристик для факторного поля мельницы.

Объективная модель измельчающего объекта может быть создана при условии хорошей изученности свойств объекта. Поэтому для создания более полного представления о факторах, определяющих работу измельчительных агрегатов, исследуются условия и режим работы оборудования, качественный и количественный состав обрабатываемого вещества. В [1, 2] описаны такие свойства вещества как плотность, крепость, абразивность, влажность, кусковатость, удельная поверхность минерального сырья, дробимость и измельчаемость. Кроме физических свойств вещества, существует и ряд технологических переменных, определяющих работу измельчающих агрегатов. С использованием методов определения степени важности параметров [3] для дробилок и мельниц были выделены такие переменные как производительность, крупность исходной руды, шаровая загрузка, ширина разгрузочной щели, а также ряд свойств вещества (крепость, плотность пульпы, содержание воды).

Физический процесс электропотребления измельчающим оборудованием является непрерывной функцией времени. Согласно [4] большинство типовых графиков нагрузки характеризуется экспоненциальной (1) либо экспоненциально-косинусной (2) корреляционными функциями:

$$K(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|}; \quad (1)$$

$$K(\tau) = D \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cdot \cos \omega_0 \cdot \tau, \quad (2)$$

где D – дисперсия; α – коэффициент затухания; ω_0 – частота колебаний.

Из-за воздействия случайных факторов электрические нагрузки оборудования дробильно-измельчительного комплекса также носят случайный характер. Непрерывный случайный процесс может быть заменен дискретной последовательностью случайных величин, а его вероятностные характеристики превращаются в последовательность оценок этих величин [5].

Основопологающей теоремой дискретного регулярного представления является теорема Котельникова [6]. Согласно этой теореме непрерывное значение случайной функции может быть представлено ее дискретными

выборками при условии, что процесс наблюдается бесконечное время ($T \rightarrow \infty$) и имеет ограниченный спектр частот (от 0 до F_c).

В работах [7, 8] показано, что случайный процесс не является процессом сингулярным и, следовательно, спектр его частот не ограничен, поэтому при использовании теоремы Котельникова для дискретизации и восстановления процесса всегда существует граничная частота F_c и ошибка восстановления функции. Величина ошибки уменьшается с уменьшением интервала дискретизации Δt . На практике широко используются методы дискретизации и восстановления случайного процесса с помощью различных интерполяционных полиномов. В [9] для восстановления непрерывных дискретных сообщений предлагается использовать алгебраические полиномы, в основном полиномы Лагранжа и их разновидности, вследствие простоты их реализации. Были представлены результаты по дискретизации и восстановлению непрерывных процессов по интерполяционным полиномам Лагранжа и ортогональным полиномам Лежандра. Следует отметить, что основополагающей теоремой дискретного регулярного представления является теорема Котельникова, а все другие методы направлены на ее уточнение.

Анализ дискретных преобразований и решение вопроса о длительности интервалов между замерами, обеспечивающей необходимую точность при восстановлении случайного процесса, приведены в работе [10]. В [11–13] дается следующая оценка необходимой длины реализации T случайного процесса, исходя из требуемой точности определения расчетных электрических нагрузок:

$$T = \frac{V_I^2}{\alpha \cdot \Delta^2} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{9 \cdot V_I^2}{1 + 18 \cdot V_I^2} \right), \quad (3)$$

где α – коэффициент затухания; $V_I = \frac{\sqrt{D_I}}{m_I}$ – коэффициент вариации тока нагрузки; Δ_I – погрешность определения расчетного тока нагрузки (величины, используемой для определения потребляемой мощности); Δm_I и ΔD_I – относительные погрешности определения математического ожидания и дисперсии тока нагрузки.

Первостепенной задачей любого исследования является определение переменных, определяющих работу системы, и структурирование таких данных. Все факторы, учитываемые при моделировании объекта, образуют его факторное поле. Далее определяется степень значимости каждого фактора, что позволяет упростить модель без потери качества. Для этих целей производится количественное исследование внутренних процессов с определенным интервалом дискретизации. Таким образом, задачи формирования как можно более полного факторного поля оборудования и определения достаточного шага дискретизации представляют собой качественную и количественную стороны исследования объекта.

Технологический процесс производства силикатного кирпича на предприятиях строительной промышленности представляет собой последовательность следующих операций (примерная типовая технология):

- доставка исходного сырья для приготовления кирпича (известь и песок);
- обжиг извести;
- транспортировка сырья ленточным конвейером в бункер питания дробилки;
- дробление извести в молотковых дробилках до крупности 1 мм;
- транспортировка дробленого продукта пневмотранспортом в бункер питания мельницы;
- измельчение в шаровой мельнице приготовленной извести и песка;
- транспортировка готового вяжущего пневмотранспортом в формовочный цех для изготовления кирпича из подготовленного сырья;
- складирование готовой продукции.

На каждом этапе технологического процесса происходит изменение физического состояния вещества при некотором расходе энергии. Для каждого этапа необходимо выявить факторы, определяющие его энергопотребление, показатели, по которым можно оценивать энергетическое состояние этапа.

Технологический процесс производства силикатного кирпича с учетом факторов, определяющих энергопотребление комплекса, представлен на рис. 1.

Выделим в факторном поле следующие группы факторов: контролируемые, регулирующие и величины, характеризующие оборудование. Регулирующие величины отнесены к самому факторному полю, а не считаются результатом его обработки, поскольку факторное поле объекта изменяется во времени и значение регулирующего воздействия в текущий момент оказывает влияние на последующее значение этого же воздействия. Однако представленная структура факторного поля не полностью отображает причинно-следственные связи при преобразовании вещества и энергии в технологическом комплексе. Поэтому для большей адекватности факторное поле управления дополняется группой факторов, описывающих обрабатываемое вещество.

Рассмотрим факторное поле шаровой мельницы. Для простейшего случая группа контролируемых факторов может быть представлена одной величиной. В процессах, где допускался значительный разброс по качеству помола, такой величиной принималась производительность оборудования. На предприятиях, где выдвигались более жесткие требования к качеству готового продукта, выходной вектор состоял из двух величин: производительности и качества. С наступлением времен дефицита энергии выходной вектор был дополнен таким фактором как электропотребление. Вследствие того, что зависимость электропотребления от производительности мельницы (степени ее загрузки) имеет слабо возрастающий характер, вместо величины электропотребления можно использовать величину удельного электропотребления на тонну продукции.

Группа величин, характеризующих оборудование, наиболее статична по сравнению с другими группами факторов. Изменения факторов из этой группы

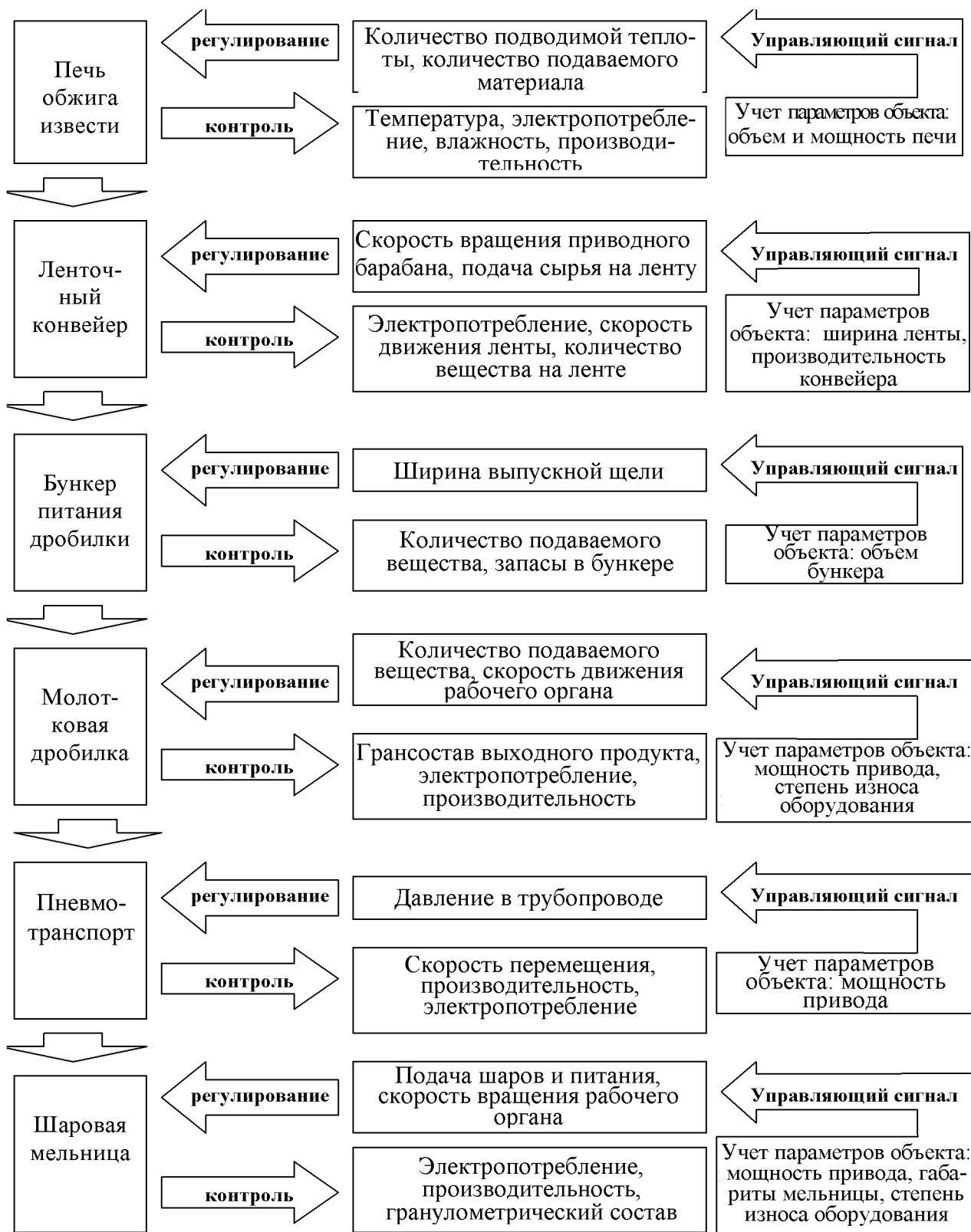


Рис. 1. Технология производства силикатного кирпича (стадии приготовления материала)

требуют гораздо больше времени, либо же при соответствующем режиме измерения могут считаться постоянными. Такой параметр как мощность привода со временем не меняется, а степень изношенности привода на отрезке времени длиной в рабочий цикл может быть принята постоянной при условии эксплуа-

тации привода в номинальном режиме. Габаритные размеры мельницы – величина постоянная, однако следует учитывать, что размеры рабочего пространства в процессе эксплуатации увеличиваются вследствие износа футеровочной брони, что ухудшает условия измельчения. Поскольку толщину футеровочных плит нельзя регулярно контролировать, то для построения факторного поля можно использовать приблизительные оценочные характеристики, например: новая, слегка изношенная, средняя степень изношенности, сильно изношенная и т. п. В дальнейшем эти характеристики будут преобразованы в некоторые числовые оценки.

В группе регулирующих факторов следует выделить такие основные факторы, как загрузка материала и шаров, скорость вращения барабана мельницы. Регулирование работы шаровой мельницы осуществляется, прежде всего, путем изменения подачи материала. Для мельниц разомкнутого цикла величина подаваемого питания является основной величиной, определяющей их производительность. Периодичность и размеры догружаемых доз сырья позволяют управлять производительностью мельницы. Для стабильно работающей мельницы количество догружаемого вещества определяется количеством измельченного вещества. При изменяющихся параметрах измельчения (степень измельчения, влажность, прочностные характеристики сырья) интервалы между загрузками по необходимости увеличивают или уменьшают. Количество подаваемого вещества в сочетании с шаровой загрузкой (кроме мельниц самоизмельчения) образует величину циркуляционной нагрузки, которая влияет на расход электроэнергии объекта. Для шаровой загрузки важным является не только масса шаров, но и их сортамент, поскольку размер шара определяет выполняемую им работу измельчения. Если мельница не оборудована специальными загрузочными устройствами, то загрузка шаров осуществляется перед началом работы (по мере необходимости). Догрузка, как правило, осуществляется шарами одного типоразмера, реже двух.

Скорость вращения мельничного барабана определяет потребляемую мощность и режим измельчения (каскадный или водопадный), а, значит, качество измельчения и износ футеровки. Скоростной режим работы зависит от степени загрузки мельничного барабана, поэтому в условиях постоянно меняющейся нагрузки необходима постоянная корректировка скорости. Применение регулируемого привода в измельчительных установках позволяет управлять потребляемой мощностью и качеством помола. Кроме того, для дробильно-измельчительных комплексов существует возможность подбора сочетания скоростей объектов различных стадий измельчения для обеспечения минимального электропотребления в целом по комплексу.

Физико-механические свойства измельчаемого вещества (прочность, влажность, абразивность, плотность, сыпучесть, кусковатость, гранулометрический состав) образуют отдельную группу факторов, которые необходимо учитывать при создании системы управления измельчением. Именно эти факторы определяют необходимый минимум энергии для выполнения технологического процесса. Прочность – основной параметр при измельчении; чем выше прочность вещества, тем больше энергии необходимо затратить на

его разрушение. При сухом измельчении увеличение влажности материала влечет за собой налипание материала на рабочие поверхности, создание «подушки», мешающей измельчению. Кусковатость и грансостав исходного питания влияют на время нахождения материала в мельнице, а, значит, на расход энергии для получения продукта измельчения заданного качества.

Факторное поле шаровой мельницы может быть представлено диаграммой Исикавы (рис. 2). Такая диаграмма отображает основные структурные связи внутри системы и позволяет наглядно представить иерархию факторов. Основные позиции на диаграмме отведены четырем группам факторов, определяющих технологический процесс. Классификация факторов внутри каждой из групп упрощает оценку влияния того или иного фактора.



Рис. 2. Факторное поле шаровой мельницы (диаграмма Исикавы)

Создание факторного поля требует определения интервалов дискретизации для разнородных факторов, различающихся как по природе, так и по скорости воздействия. Согласно [14] приближенное значение Δt может быть определено из следующих формул:

$$N = \frac{3}{4} \cdot \frac{m}{\varepsilon^2}; \quad (4)$$

$$T = N \cdot \Delta t, \quad (5)$$

где Δt – шаг дискретизации; N – число точек реализации; ε – точность вычислений (в долях единицы); m – число ординат оценки корреляционной функции, характеризующее интервал корреляции случайного процесса.

Отсюда, преобразуя (4), (5), получим выражения для определения интервала дискретизации:

$$\Delta t = \frac{4}{3} \cdot T \cdot \frac{\varepsilon^2}{m}. \quad (6)$$

Определим период дискретизации для объектов дробильно-измельчительного комплекса, используя следующие исходные данные. Длительность выборки полагаем равной времени работы цеха измельчения в сутки $T = 12$ часов. Достаточной точностью вычислений считаем $\varepsilon = 10\%$. Поскольку объекты комплекса обладают большой инерционностью и за время, равное периоду дискретизации, изменений, существенно влияющих на работу комплекса, не происходит, то принимаем $m = 1$. Тогда, согласно формуле (6), период дискретизации $\Delta t = 10$ мин.

Минимальные интервалы времени между замерами шаровой загрузки и качества помола, необходимые для построения адекватной модели измельчения, определяются исходя из технологических условий. Согласно требованиям к производству силикатного кирпича проверка качества измельченной смеси должна проводиться один раз в час. Контроль за догрузкой мелющих тел для мельниц с загрузкой шаров через люк возможен раз в смену при остановке барабана.

Технологически установленные интервалы между замерами качества помола и массы шаровой догрузки превышают период дискретизации, принятый для электрических нагрузок, поэтому в качестве базового интервала дискретизации принимаем интервал для определения электрических нагрузок.

На основании приведенных данных возможно построение нейронной сети для управления дробильно-измельчительным комплексом [15, 16]. Контролируемые параметры выступают в качестве выходного вектора, а соответствующие им значения регулируемых величин, параметров оборудования и свойств измельчаемого вещества – в качестве входного вектора. Построение управляющей нейронной сети целесообразно не только для всего комплекса в целом, но и для отдельных его элементов (этапов), которые по результатам энергоаудита окажутся наиболее энергоемкими и будут иметь наибольшие возможности регулирования.

Выводы

1. Разработано факторное поле шаровой барабанной мельницы, включающее четыре группы факторов: контролируемые, регулирующие, величины, характеризующие оборудование и физико-механические свойства вещества. Факторное поле изображено в виде диаграммы Исикавы.

2. Рассчитан период дискретизации измерений, необходимых для получения данных об энергопотреблении объекта. Этот период дискретизации

составляет 10 минут и принят за базовый период времени для исследования свойств системы.

1. *Технологическая оценка* минерального сырья. Методы исследования: Справочник / Под ред. П. Е. Остапенко. – М.: Недра, 1990.

2. *Ржевский В. В., Новик Г. Я.* Основы физики горных пород: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1984.

3. *Белых Б. П., Махнев А. М., Олейников В. К.* Определение степени влияния отдельных факторов на технологическое электропотребление железорудных обогатительных фабрик // Промышленная энергетика. – № 8, 1975.

4. *Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л., Степанов В. П.* Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.

5. *Гайдукевич В. И., Титов В. С.* Случайные нагрузки силовых электроприводов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.

6. *Котельников В. А.* Теория потенциальной помехоустойчивости. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 151 с.

7. *Харкевич А. А.* О теореме Котельникова // Радиотехника, 1956. – Т. 13, № 8.

8. *Хлистунов В. Н.* Основы цифровой электроизмерительной техники и цифровые преобразователи. – М.: Энергия, 1966. – 345 с.

9. *Новоселов О. Н., Фомин А. Ф.* Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. – М.: Машиностроение, 1980. – 280 с.

10. *Калинчик В. П.* Контроль и оперативное управление электропотреблением в промышленных сетях: Дис... канд. техн. наук: 05.14.02. – К., 1983. – 287 с.

11. *Мирский Г. Я.* Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1982.

12. *Саенко Ю. Л.* Разработка уточненных методов выбора токоведущих частей и трансформаторов при резкопеременных нагрузках. Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1986.

13. *Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л.* Оценка времени нагрева проводников изменяющимся во времени током // Известия вузов. Сер. «Энергетика». – 1983. – № 8. – С. 3–8.

14. *Грибанов Ю. И. Мальков В. Л.* Спектральный анализ случайных процессов. М.: Энергия, 1974. – 240 с.

15. *Розен В. П., Мейта А. В.* Некоторые вопросы информационного описания дробильно-помольного комплекса в условиях создания автоматизированной системы управления // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Тірництво”: Зб. наук. праць. – К., 2002. – Вип. 6. – С. 95–100.

16. *Розен В. П., Калинчик В. П., Мейта А. В.* Применение моделей на базе нейронных сетей для решения многокритериальной задачи управления дробильно-измельчительным комплексом // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Тірництво”: Зб. наук. праць. – К., 2003. – Вип. 8. – С. 134–141.