

2. **Isoc T., Leach F., Bobean C., Pavel V., Vadan I.** Study and design of a wing oscillating wind system, *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 7th International Symposium*, 2011, pp. 1–4.
3. **Klimina L.** Dynamics of a slider-crank wave-type wind turbine, *Proceedings of the Fourteenth International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science World Congress (2015 IFToMM World Congress)*, 7 p.
4. **Dosaev M. Z., Lin Ching-Huei, Lu Wen-Lung, Samsonov V. A., Selyutskii Yu. D.** A qualitative analysis of the steady modes of operation of small wind power generators, *J. Appl. Math. Mech.*, 2009, vol. 73, no. 3, pp. 259–263.
5. **Tabachnikov V. G.** *Statsionarnie kharakteristiki kriliev na malikh skorostyakh vo vsem diapazone uglov ataki* (Steady characteristics of wings for small values of speed for the whole range of angle of attack), *Trudy TSAGI*, 1974, vol. 1621, pp. 79–93 (in Russian).
6. **Bautin N. N., Leontovich E. A.** *Metodi I priemi kachestvennogo issledovania dinamicheskikh system na ploskosti* (Methods and techniques of the qualitative research of the dynamic systems in the plane), Moscow, Nauka, 1990 (in Russian).
7. **Sathyajith Mathew.** *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer, Netherlands, 2006, 252 p.
8. **Koki Kishinami, Hiroshi Taniguchi, Jun Suzuki, Hiroshi Imano, Takashi Kazunou, Masato Turuhami.** Theoretical and experimental study on the aerodynamic characteristics of a horizontal axis wind turbine, Elsevier, *Energy*, 2005, vol. 30, pp. 2089–2100.
9. **Klimina L. A.** Rotational modes of motion for an aerodynamic pendulum with a vertical rotation axis, *Moscow University Mechanics Bulletin*, 2009, vol. 64, no. 5, pp. 126–129.
10. **Kamoji M. A., Kedare S. B., Prabhu S. V.** Performance tests on helical Savonius rotors, *Renewable Energy*, Elsevier, 2009, vol. 34, pp. 521–529.

УДК 004.896 + 622.732

DOI: 10.17587/mau.17.540-546

**Ю. И. Еременко**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., **Д. А. Полещенко**, канд. техн. наук, доц.,  
**А. И. Глущенко**, канд. техн. наук, доц., **Ю. М. Пожарский**, канд. техн. наук, доц.,  
 Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова,  
 филиал Национального исследовательского технологического университета "МИСиС"  
**С. В. Солодов**, канд. техн. наук, зам. директора института  
 "Информационных технологий и автоматизированных систем управления", доц.,  
 Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"

## Нейросетевая альтернатива амплитудному анализу спектра в задаче определения уровня загрузки шаровой мельницы

*Рассматривается возможность применения современных интеллектуальных способов обработки информации для оценки степени заполнения шаровой мельницы.*

*Обсуждается разработка и исследование метода обработки информации, позволяющего выделять в спектре снимаемого сигнала виброускорения цапфы шаровой мельницы скрытые зависимости и закономерности, позволяющие эффективно оценить уровень загрузки ее барабана, которые сложно выявить и проанализировать классическими методами, например амплитудным анализом спектра.*

**Ключевые слова:** степень заполнения мельницы, акселерометр, спектральный анализ, шаровая мельница, виброускорение, нейронная сеть, обучение НС

### Введение

Вращающаяся барабанная мельница представляет собой пустотелый цилиндрический барабан, закрытый торцевыми крышками, заполненный определенным количеством измельчающих тел и вращающийся вокруг горизонтальной оси. При вращении барабана измельчающие тела благодаря трению увлекаются внутренней поверхностью барабана и поднимаются на некоторую высоту, затем свободно падают или скатываются вниз.

В непрерывно работающей мельнице измельчаемый материал подается через центральное отверстие в одной из крышек внутрь барабана и, продвигаясь вдоль него, за счет подаваемой в то же отверстие воды подвергается воздействию измельчающих тел. При этом измельчение частиц материала происходит в результате ударов падающих измельчающих тел, истирания и раздавливания между телами.

У шаровых мельниц измельчающая среда состоит из стальных или чугунных шаров одного или нескольких размеров.

Корпус барабана и торцевые стенки внутри футеруются бронеплитами, изготовленными из износостойкого металла.

Мелющими телами являются литые стальные шары диаметром от 30 до 125 мм, шаровая загрузка в среднем составляет 42 % внутреннего объема барабана. Расход стальных шаров составляет примерно 0,09 кг на 1 кВт·ч энергии, затраченной на измельчение.

Разгрузка измельченного материала происходит свободным сливом через пустотелую разгрузочную цапфу, поэтому уровень пульпы в мельнице несколько выше нижней образующей поверхности отверстия разгрузочной цапфы, так как ее диаметр значительно меньше диаметра барабана.

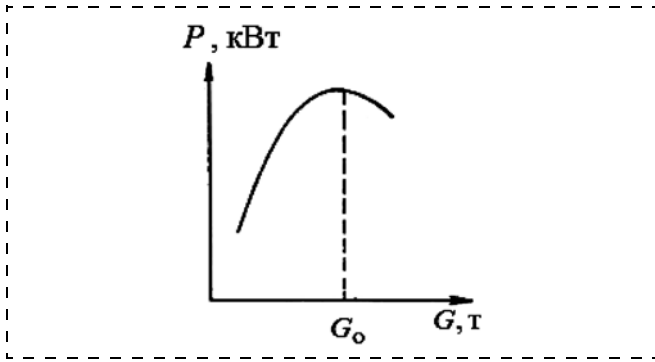


Рис. 1. Зависимость мощности привода от внутримельничного заполнения

Производительность мельницы пропорциональна расходу энергии на измельчение. Расход энергии связан со степенью заполнения объема мельницы дробящей средой. С ростом степени заполнения мельницы средой растет расход энергии на измельчение и достигает максимума при степени заполнения 45...50 %. Соответственно растет и производительность мельницы и достигает максимума на 45...50 %. Дальнейшее увеличение степени заполнения мельницы дробящей средой приводит к уменьшению расхода энергии и производительности мельницы (рис. 1). Степень заполнения  $\varphi$  связана с величиной внутримельничного заполнения  $G$ .

$$G = \pi R^2 L \rho \varphi,$$

где  $L$  — длина барабана,  $R$  — радиус барабана,  $\rho$  — объемная масса шаров.

Внутримельничное заполнение  $G$ , в свою очередь, связано с мощностью, потребляемой приводным электродвигателем  $P$ .

Экстремальный характер характеристики можно объяснить тем, что с дальнейшим увеличением  $G$  происходит центрифугирование (мельница уподобляется маховому колесу). При этом уменьшается мощность и расход энергии [1].

Процесс измельчения сырья, который широко используется в различных отраслях промышленности, характеризуется высокой ресурсоемкостью и во многом определяет качество дальнейшей переработки сырья. Однако существующий уровень автоматизации процессов измельчения не обеспечивает ведения стабильного и оптимального по параметрам процесса.

На сегодняшний день на горно-обогатительных предприятиях при переработке рудного материала в шаровых мельницах операторы испытывают определенные трудности при управлении данными агрегатами. Суть проблемы заключается в том, что оптимальный по удельному расходу энергоресурсов режим работы объекта состоит в максимально возможной загрузке барабана мельницы рудным материалом. В свою очередь, данный режим характеризуется тем, что объект при подаче в мельницу излишнего объема руды может перейти в состоя-

ние перегруза, которое сопровождается выносом из мельницы крупной фракции и шаров и приводит к необходимости аварийной остановки объекта [2]. Как следствие, простой мельницы до устранения последствий перегруза ведет к существенным экономическим потерям предприятия. Чтобы избежать подобного негативного явления оператор мельницы вынужден работать в режиме недогруза, объем которого может составлять до 15 %. При большой энергоемкости привода мельницы (3...4 МВт) повышение производительности даже на 1 % может принести существенную экономическую прибыль предприятию.

### Постановка задачи исследования

На сегодняшний день на многих горно-обогатительных комбинатах работают шаровые мельницы, в которых измельчается рудная масса. На мельницу в загрузочную горловину поступают руда, вода и недоизмельченный концентрат (циркуляционная нагрузка) с классификаторов или гидроциклонов. Также ориентировочно один раз за смену выполняется загрузка 6...7 т шаров. Разгрузка мельницы осуществляется непрерывно через бутару разгрузочной горловины, в которую также подается вода.

Как уже отмечалось, производительность мельницы связана с уровнем заполнения ее барабана. К сожалению, на сегодняшний день ввиду сильных возмущений, таких как изменяющиеся свойства руды, истирание шаров и бронеплит и т. п., отсутствует способ измерения данного уровня, способный в реальных условиях гарантировать требуемую точность измерений и работу объекта без перехода в состояние перегруза.

Давно известны методы определения степени заполнения барабана мельницы на базе анализа сигналов звука, возникающего в результате вращения барабана и вибрации ее цапф. Существует промышленный прибор, такой как ВАЗМ-1 [3], в основе работы которого лежит анализ спектра получаемых сигналов. Однако для управления загрузкой данное устройство не используется, так как его показания не обеспечивают требуемую точность, необходимую для целей управления, а показывают лишь направление изменения объема рудной массы в барабане мельницы. Это происходит вследствие того, что процесс помола руды достаточно сложен и многофакторен. На состояние спектра оказывают влияние твердость руды, объем и степень износа шаровой загрузки, механические составляющие зубчатых соединений узлов вращения барабана, состояние брони мельницы и т. д. Вследствие указанных причин спектр звука и вибрации процесса измельчения изменяются, что требует перенастройки параметров ВАЗМ. В реалиях производства подбором оптимальных параметров устройства не занимаются и работают на исходных настройках.

Аналогичный способ обработки информации предлагается в работе [4] с той лишь разницей, что

анализируется только сигнал виброускорения барабана мельницы. Также в работе предлагается алгоритм оптимизации для подбора весовых коэффициентов для соответствующих спектральных областей. Однако, как отмечают сами авторы, данный подход не способен установить нелинейную связь между гармониками спектра сигнала виброускорения и характеристиками мельницы.

В работах [5, 6] также рассматривается спектр сигнала виброускорения, для анализа которого предлагается использовать нейронные сети прямого распространения. Однако конкретизация параметров сети и алгоритмов обработки информации (формирование обучающей выборки, алгоритм обучения) в работе не приводится. Объектом исследований в данных работах является шаровая мельница по измельчению цемента.

Целью данной работы является поиск нового, более эффективного метода обработки данного сигнала за счет применения современных интеллектуальных алгоритмов [7, 8] с возможным выявлением зависимостей, характеризующих процесс загрузки барабана мельницы.

#### Сбор экспериментальных данных и их обработка методом, аналогичным реализованному в комплексе ВАЗМ

Для сбора экспериментальных данных для последующей разработки указанного метода был проведен ряд опытов в лабораторных условиях. В качестве объекта исследования была использована полупромышленная шаровая мельница (рис. 2).

В качестве датчика получения сигнала виброускорения использовался вибропреобразователь общего назначения AP 2037 с осевой чувствительностью 10,1 мВ/г и частотным диапазоном 0,5...15 000 Гц. Данный датчик был установлен на цапфе мельницы. Сигнал с датчика AP 2037 поступал на четырехканальный, 24-разрядный модуль аналогового ввода National Instruments NI 9234, имеющий четыре BNC коннектора для подключения четырех каналов аналогового ввода с одновременной оцифровкой сигналов. Данный модуль устанавливается в специальное шасси NI cDAQ-9191, подключаемое к ПК через USB-интерфейс.

В процессе эксперимента в барабан мельницы было загружено 8 кг шаров (опыт 1), что составляет 40 % от полной загрузки мельницы ( $G$ ), после чего с шагом 400 г загружался рудный материал (опыт 2—4) до загрузки в барабан мельницы 9,2 кг и с шагом 200 г (опыт 5—12) до загрузки 2,8 кг рудной массы, что ориентировочно составляет 50 % загрузки барабана.

В целях последующей проверки адекватности разрабатываемого ме-

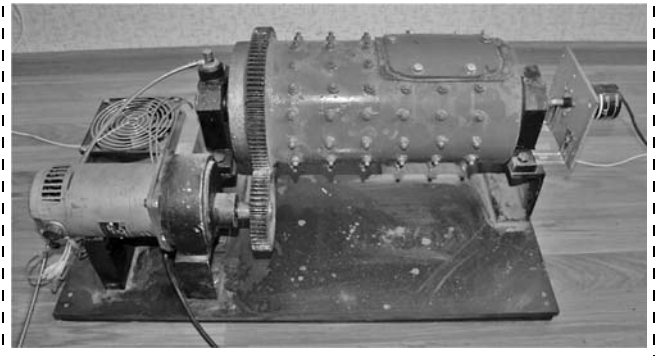


Рис. 2. Установка для проведения исследований

тода в условиях действия помех были проведены опыты с шумом. Для этого из мельницы выгружали 300 г шаров и проводили замеры на загрузке рудной массой от 2 кг до 2 кг 800 г с шагом 200 г. При этом для каждого из указанных режимов снимали сигнал виброускорения с частотой 30 кГц.

Для обработки результатов измерений и выявления закономерностей был проведен спектральный анализ полученных сигналов [9, 10]

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-j2\pi(k-1)(n-1)N^{-1}},$$

где  $X(k)$  — дискретное Фурье-изображение сигнала виброускорения (амплитуда гармоник спектра);  $x(n)$  — значения измеренного сигнала;  $n$  — номер точки от начала процесса;  $k$  — номер значения частоты.

В качестве примера на рис. 3, а приведен спектр сигнала виброускорения цапфы полупромышленной мельницы при загрузке 2 кг рудной массы. Видно, что примерно половина спектра неинформативна, поэтому для дальнейших исследований выделялась составляющая спектра в диапазоне от 0 до 6,5 кГц (рис. 3, б).

Для дальнейшей обработки спектра была применена методика, аналогичная вычислениям в вибро-

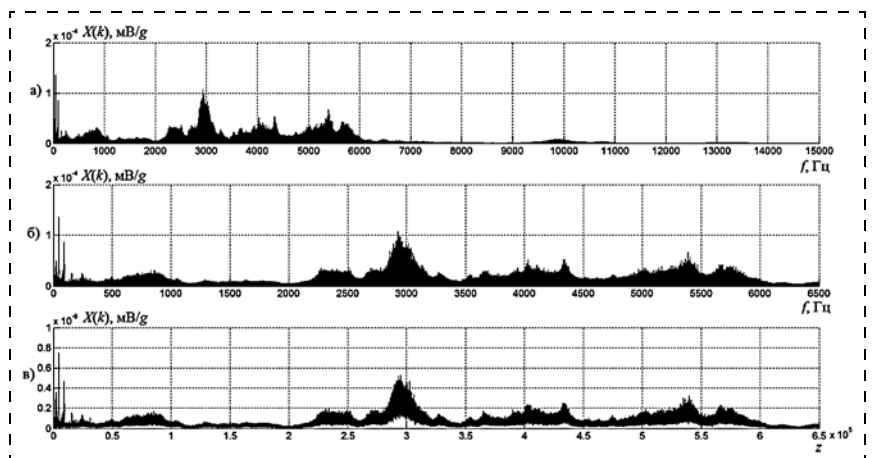


Рис. 3. Усредненные тренды сигналов виброускорения:

а, б — спектр сигнала виброускорения мельницы; в — усредненный спектр сигнала виброускорения мельницы

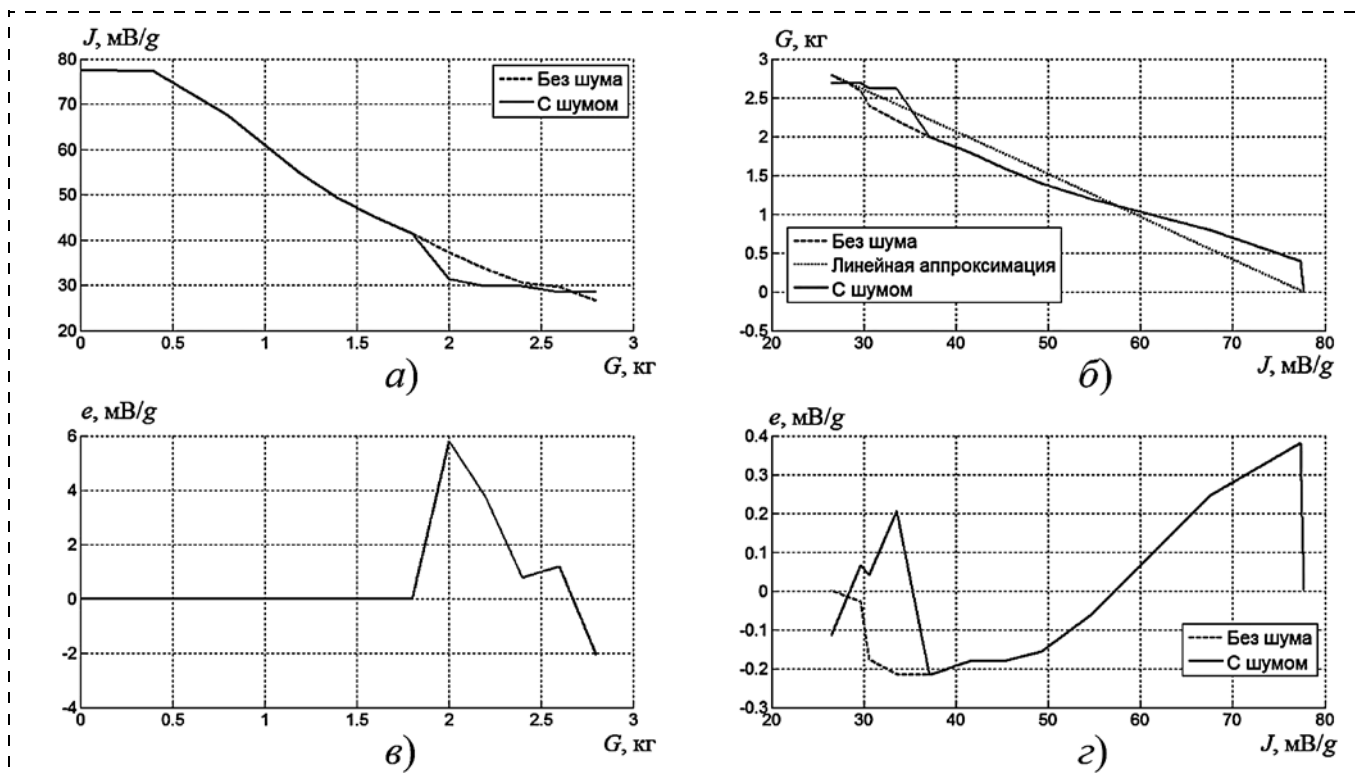


Рис. 4. Оценка корреляции значений вычисленного критерия  $J$  и загрузки, а также соответствующие рассогласования  $e$

акустическом анализаторе (ВАЗМ). Для этого был сформирован критерий:

$$J = \int_{F_{\min}}^{F_{\max}} X(f)df,$$

где  $f = k\delta$  — частота гармонической составляющей сигнала виброускорения цапфы мельницы;  $\delta$  — шаг дискретизации спектра по частоте;  $X(f)$  — амплитуда гармоники на частоте  $f$ ;  $F_{\min}$  — нижняя граница исследуемого частотного диапазона (0 Гц);  $F_{\max}$  — верхняя граница исследуемого частотного диапазона (6,5 кГц).

Для заданного диапазона частот для каждого уровня загрузки мельницы для опытов с шумом и без шума были построены графики изменения критерия  $J$  в зависимости от загрузки барабана мельницы, представленные на рис. 4, а. На основании данных опыта без шума была построена линейная зависимость критерия от загрузки относительно точек минимальной и максимальной загрузки, а затем по ней рассчитаны значения воспроизводимой загрузки относительно критерия в опытах с шумом (рис. 4, б). Тем самым моделировали ситуацию настройки системы по текущим параметрам с дальнейшим изменением условий работы объекта.

При тестировании системы в условиях шума значение критерия  $J$  носит нелинейный характер.

При этом существенно снизилась чувствительность метода, т. е. при разном уровне загрузки рудой значение критерия изменяется незначительно, либо остается постоянным, что в условиях производства может привести к перегрузу мельницы.

По результатам опытов показано, что методика обработки информации, базирующаяся сугубо на амплитудном анализе спектра сигнала виброускорения, сильно подвержена различным возмущениям. Данные возмущения вносят дополнительные нелинейности в и без того сложный процесс и искажают ту информативную составляющую, которая отвечает за соотношение между критерием  $J$  и уровнем заполнения барабана мельницы. В спектре сигнала виброускорения цапфы мельницы присутствует информация об уровне загрузки барабана, но в условиях возмущений она содержится в более сложных зависимостях между отдельными гармоническими составляющими спектра, чем это может выявить амплитудный анализ. Известно, что выявлять скрытые зависимости в данных могут нейронные сети [11, 12].

Таким образом, достаточно целесообразным выглядит применение аппарата нейронных сетей для обработки спектра сигнала виброускорения цапфы мельницы в целях установления зависимости между уровнем вибрации и степенью заполнения ее барабана.

### Метод решения задачи с применением нейронной сети

В данной работе для решения указанных проблем предлагается использовать радиально-базисную (РБФ) нейронную сеть (НС) (рис. 5). Данная сеть состоит из трех слоев. Число входов связано со спецификой обработки спектра сигнала виброускорения, а именно с числом точек усреднения. Данные точки получаются в результате усреднения исходного спектра с определенной шириной окна (точностью) по формуле

$$a(z) = \frac{1}{\Delta} \left\{ \sum_{j=1+\Delta(z-1)}^{z\Delta} X_j \right\}, \quad z = \overline{1, Z_{\max}},$$

где  $\Delta$  — число гармоник с шагом дискретизации спектра  $X$ , по которым проводится усреднение;  $z$  — номер усредненного значения спектра измеренного сигнала;  $z_{\max}$  — общее число усредненных значений спектра измеренного сигнала.

$$z_{\max} = \frac{(F_{\max} - F_{\min})l}{\Delta},$$

где  $l$  — число экспериментальных точек сигнала, используемых для расчета спектра.

Исходный спектр при получении информации на указанном выше оборудовании с шириной окна для получения спектра  $l = 900$  точек съема с частотой 30 кГц имеет  $13,5 \cdot 10^6$  значений гармонических составляющих с дискретностью  $\delta = 0,07$  мкГц. Для сокращения объема информации, подаваемой на нейронную сеть, без потери в качестве ее работы было проведено усреднение спектра по  $\Delta = 20$  гармоникам (см. рис. 3, в). Таким образом, во входном слое использовали  $z_{\max} = 650\,000$  нейронов с распределительными функциями. В скрытом слое сети использовались  $M = 12$  нейронов с радиально-базисной функцией. Число нейронов в данном слое связано с методом обучения, при котором для каждого обучающего примера (12 опытов) создается нейрон в скрытом слое, который отвечает за расстояние между многомерными входными векторами, характеризующими текущий уровень загрузки барабана мельницы, и конкретным обучающим примером. В выходном слое использовался один ней-

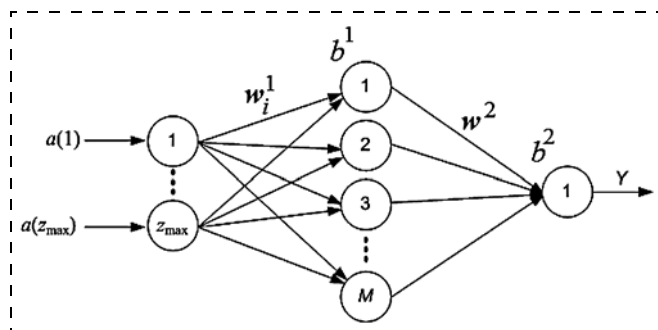


Рис. 5. Структура нейронной сети

рон для формирования сигнала уровня заполнения барабана полупромышленной мельницы.

Модель данной сети имеет следующий вид:

$$Y = K_{\text{лин}} \left( \sum_{i=1}^M e^{-\langle \|a - w_i\| b^1 \rangle w_i^2} \right) + b^2,$$

$$b^1 = \frac{0,8326}{\alpha},$$

где  $Y$  — выход нейронной сети, характеризующий уровень заполнения барабана;  $K_{\text{лин}}$  — коэффициент усиления линейной функции активации, принятый равным 1 ( $K_{\text{лин}} = 1$ );  $a$  — вектор усредненных значений спектра измеренного сигнала:  $a(a(1), \dots, a(z_{\max}))$ ;  $w_i^1 = (w_{i1}^1, w_{i2}^1, w_{i3}^1, \dots, w_{i z_{\max}}^1)$  — вектор весовых коэффициентов  $i$ -го нейрона радиального слоя;  $w_i^2$  — весовой коэффициент связи выходного нейрона с  $i$ -м нейроном скрытого слоя;  $b^1$  — смещение нейронов радиального слоя;  $b^2$  — смещение нейрона выходного слоя;  $\alpha$  — интервал значимости входа радиальной функции активации.

Обучение сети проводили стандартными методами языка MATLAB, а именно функцией `<newrb>` [6], с интервалом значимости  $\alpha = 1,2$ . На входы подавали усредненные спектры сигналов виброускорения цапфы полупромышленной мельницы для различных режимов загрузки: от 0 до 2,8 кг с указанным выше шагом, а в качестве целевых значений использовали соответствующие значения загрузки барабана. Работа сети на данных обучающей выборки представлена на рис. 6, а. Видно, что данная выборка идеально воспроизводится с порядком ошибки  $10^{-6}$  (рис. 6, б).

После обучения на НС для тестирования были поданы входные данные, которые были получены в опытах с шумом. Полученный график представлен на рис. 6, в, а отклонение от целевых значений — на рис. 6, г.

Так как эксперимент проводили с фиксированными шагами, то было известно, какой объем руды находится в мельнице. На промышленном объекте провести подобный опыт практически невозможно, поэтому была предпринята попытка использовать минимальную обучающую выборку. Предложено использовать данные при чисто шаровой загрузке (их можно снять при пуске мельницы после ремонта); при максимально возможной загрузке (их можно снять при непосредственном контроле объекта машинистом мельницы в целях недопущения ее перегруза); при средней загрузке барабана мельницы (условно данное значение можно снять при среднем значении расхода руды в мельницу).

Результат работы нейронной сети, обученной по выборке, состоящей из набора данных для трех уровней загрузки: 0, 1,8 кг, 2,8 кг, представлен на рис. 6, д. По уровню ошибки (рис. 6, е) видно, что

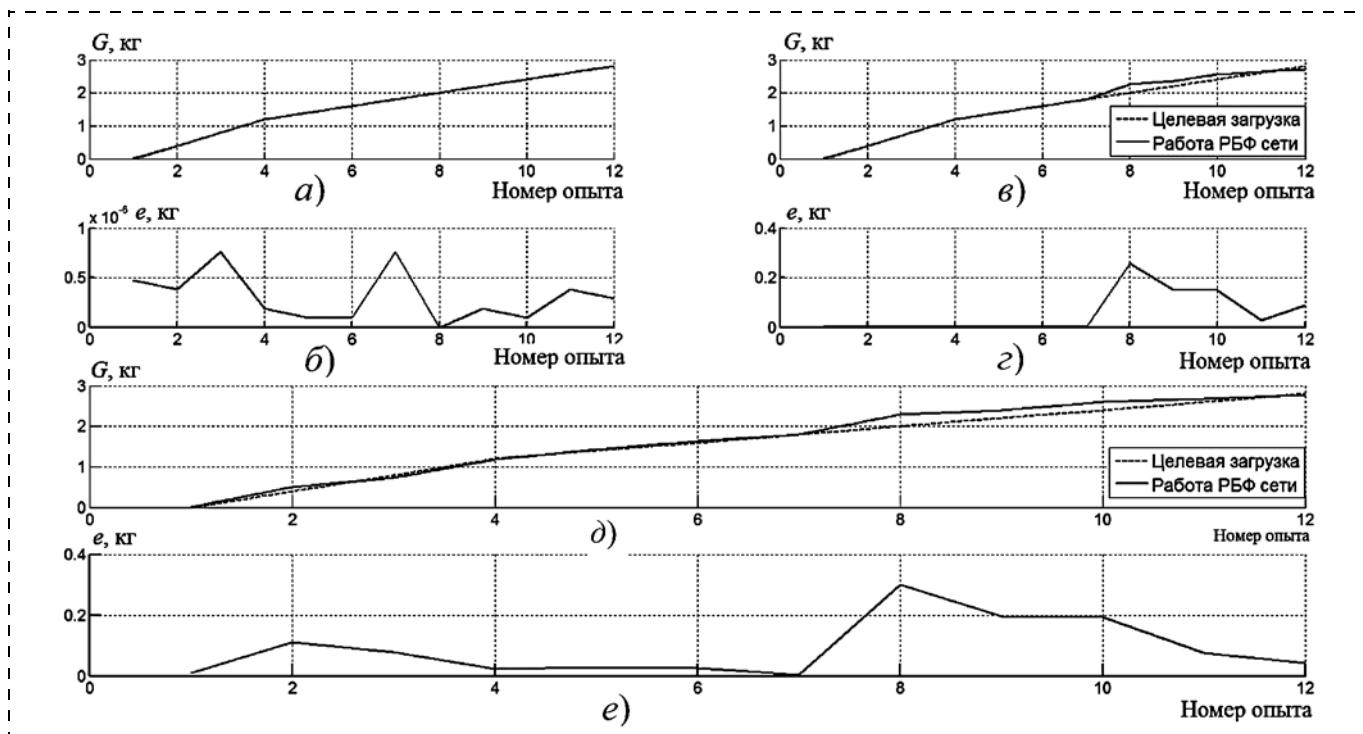


Рис. 6. Результаты использования нейронной сети для оценки загрузки

при ее увеличении относительно ошибки сети, обученной на полной выборке (рис. 6, з), аппроксимирующие свойства сохранились, и динамика загрузки передается без потери чувствительности, характерной для вибро-акустического анализа. При сходных по абсолютному значению ошибках между реальной загрузкой и рассчитанными значениями по обоим методам характер изменения более точно выдерживается для НС подхода. Таким образом, по результатам опытов можно утверждать, что НС подход способен обеспечить нечувствительность к 3,75 % изменению шаровой загрузки. Для промышленной мельницы этого достаточно, так как подгружают шары в режиме реального времени по одному кубелю, масса шаров в котором составляет 6...7 т, т. е. 2,6 % от шаровой загрузки мельницы, составляющей ориентировочно 270 т.

### Заключение

По результатам опытов можно сделать вывод о том, что радиально-базисная нейронная сеть является более эффективным средством для обработки сигнала виброускорения в целях выявления зависимости между изменением его спектра и уровнем загрузки шаровой мельницы, чем амплитудный анализ, применяемый в комплексе ВАЗМ. Также вполне определенным является дальнейшее направление исследований, которое будет заключаться в оптимизации как структуры НС, так и, что более важно, в поиске наиболее информативных областей в спектре сигнала виброускорения, характеризующих уровень загрузки, для снижения погрешности формируемого НС выходного сигнала.

### Список литературы

1. Инструкция по эксплуатации мельниц МШЦУ 5500×6500 № 2615.
2. Андреев С. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 320 с.
3. Улитенко К. Я., Маркин Р. П., Соколов И. В. Виброакустический анализ процессов дробления и измельчения на горно-обогатительных предприятиях // Горный журнал. 2009. № 10. С. 72–76.
4. Jian Tang, Tianyou Chaia, Lijie Zhaoa, etc. Soft sensor for parameters of mill load based on multi-spectral segments PLS sub-models and on-line adaptive weighted fusion algorithm // Neurocomputing. 2012. N. 78. P. 38–47.
5. Gugel K., Moon R. M. Automated mill control using vibration signal processing // IEEE Cement Industry Technical Conference, 2007. P. 17–25.
6. Gugel K., Palcios G., Ramirez J., Parra M. Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing technology // IEEE Cement Industry Technical Conference. Dallas, United States. 2003. P. 311–318.
7. Хайкин С. Нейронные сети. М.: ООО И. Д. Вильямс, 2006. 1104 с.
8. Еременко Ю. И., Полещенко Д. А., Глущенко А. И. Синтез системы управления чашевым окомкователем с нейросетевой надстройкой и оценка ее эффективности относительно шаровой системы экстремального управления // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2011. № 10. С. 56–61.
9. Юкио Сато. Без паники! Цифровая обработка сигналов: Пер. с яп. Т. Г. Селиной. М.: Додэка-XXI, 2010. 176 с.
10. Пожарский Ю. М., Полещенко Д. А., Подковыров И. Ю. Определение степени заполнения мельницы мокрого самоизмельчения с применением беспроводных технологий // Горный журнал. 2013. № 2. С. 115–118.
11. Hornick K., Stinchcombe M., White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators // Neural Networks. 1989. Vol. 2, № 5. P. 359–366.
12. Cybenko G. Approximation by superposition of a sigmoidal function // Math. Control Systems and Signals. 1989. № 2. P. 303–314.

# Neural Network as an Alternative to the Amplitude Spectrum Analysis for Measurement of the Ball Mill Fill Level

**Y. I. Eremenko**, erem49@mail.ru, **D. A. Poleshchenko**, po-dima@yandex.ru ✉,

**A. I. Glushchenko**, strondutt@mail.ru, **Y. M. Pozharsky**, pem31@mail.ru,

Sary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov, Branch of the National University of Science and Technology "MIS & S", 309516, Belgorod Region, Russian Federation,

**S. V. Solodov**, saup.misis@gmail.com,

National University of Science and Technology "MIS & S", Moscow, 119049, Russian Federation

*Corresponding author: Poleshchenko Dmitry A.*, Ph. D., Associate Professor of the Department of Automated and Information Control Systems, Sary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov, Branch of the National University of Science and Technology "MIS & S", 309516, Belgorod Region, Russian Federation, e-mail: po-dima@yandex.ru

Received on November 05, 2015

Accepted on January 27, 2016

*Modern intelligent methods for information processing are used to estimate the filling level of the ball mills. This problem has been topical for a long time. Moreover, the increasing number of the used ball mills makes it even more important. The main objective is that the ball mill's functioning mode, which is optimal from the point of view of the energy efficiency, can be reached, if the mill is loaded with the ore as much as possible. In its turn, such a mode may cause an overloading in case of any additional ore supply. This leads to the balls' and ore grain's coarse blowout and, as a result, the mill emergency stopping. As a consequence, the mill downtime results in economic losses. The main aim of this research is to develop a method for processing of the vibration acceleration signal from the ball mill's pin in order to discover the hidden dependencies in it. Such dependencies will allow us to estimate the mills' filling level more effectively, but they cannot be discovered by the classical methods, like spectrum analysis of the signal amplitude. A pilot ball mill is used in the laboratory conditions in order to reach such results. A vibration acceleration sensor is set at its pin. A ball load is changed during experiments. A training set for a neural network is formed as a result of the spectrum analysis of the signal obtained from the sensor. The neural network helped to find a relation between the vibration acceleration spectrum and the ball mill filling level. After the conducted experiments a conclusion can be made that such a network is insensitive to the noise caused by a change of the ball load. This insensitivity is higher in comparison with the methods, which are used as a basis for the conventional vibration-acoustic analyzers.*

**Keywords:** mill fill level, accelerometer, spectrum analysis, ball mill, vibration acceleration, neural network, neural network training process

For citation:

**Eremenko Y. I., Poleshchenko D. A., Glushchenko A. I., Pozharsky Y. M., Solodov S. V.** Neural Network as an Alternative to the Amplitude Spectrum Analysis for Measurement of the Ball Mill Fill Level, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 8, pp. 540–546.

DOI: 10.17587/mau.17.540-546

## References

1. **Instruktsiya po ekspluatatsii mel'nits MShTsU 5500×6500 № 2615** (Central discharge ball mill 5500×6500 service manual № 2615) (in Russian).
2. **Andreev S. E.** *Droblenie, izmel'chenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh* (Crushing, grinding and screening of minerals), Moscow, Nedra, 1980, 320 p. (in Russian).
3. **Ulitenko K. Ja., Markin R. P., Sokolov I. V.** *Vibroakusticheskij analiz processov droblenija i izmel'chenija na gorno-obogatitel'nyh predpriyatijah* (Vibroacoustic analysis of crushing and grinding processes at mineral processing plants), *Gornyj Zhurnal*, 2009, no. 10, pp. 72–76 (in Russian).
4. **Jian Tang, Tianyou Chaia, Lijie Zhaoa**, etc. Soft sensor for parameters of mill load based on multi-spectral segments PLS sub-models and on-line adaptive weighted fusion algorithm, *Neurocomputing*, 2012, no. 78, pp. 38–47.
5. **Gugel K., Moon R. M.** Automated mill control using vibration signal processing, *IEEE Cement Industry Technical Conference*, 2007, pp. 17–25.
6. **Gugel K., Palcios G., Ramirez J., Parra M.** Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing technology, *IEEE Cement Industry Technical Conference*, Dallas, United States, 2003, pp. 311–318.
7. **Hajkin S.** *Nejronnye seti* (Neural networks), Moscow, OOO I. D. Vil'jams, 2006, 1104 p. (in Russian).
8. **Eremenko Y. I., Poleshchenko D. A., Glushchenko A. I.** *Sintez sistemy upravlenija chashevym okomkovatelem s nejrosetevoj nadstrojkoj i ocenka ee jeffektivnosti otositel'no shagovoj sistemy jekstremalnogo upravlenija* (On bowl pelletizer control system with neural tuner synthesis and its efficiency estimation according to step extremal control system), *Mekhatronika. Avtomatizacija. Upravlenie*, 2011, no. 10, pp. 56–61 (in Russian).
9. **Jukio Sato.** *Bez paniki! Cifrovaja obrabotka signalov* (Don't panic! Digital signal processing), Moscow, Dodjeka-HHI, 2010, 176 p. (in Russian).
10. **Pozharskij Y. M., Poleshchenko D. A., Podkovyrov I. Y.** *Opreделение stepeni zapolnenija mel'nicy mokrogo samoizmel'chenija s primeneniem besprovodnyh tehnologij* (Definition of the filling degree of wet autogenous mill, using the wireless technologies), *Gornyj Zhurnal*, 2013, no. 2, pp. 115–118 (in Russian).
11. **Hornick K., Stinchcombe M., White H.** Multilayer feedforward networks are universal approximators, *Neural Networks*, 1989, vol. 2, no. 5, pp. 359–366.
12. **Cybenko G.** Approximation by superposition of a sigmoidal function, *Math. Control Systems and Signals*, 1989, no. 2, pp. 303–314.