

КУЗНЕЦОВ Н.М. (Центр физико-технических проблем энергетики Севера Федерального государственного бюджетного учреждения науки Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты)

МОРОЗОВ И.Н. (Мурманский арктический государственный университет, г. Мурманск)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Рассмотрена возможность прогнозирования электропотребления для шаровой мельницы обогатительной фабрики при внедрении интеллектуальной системы прогнозирования. Составлена модель для определения потребляемой мощности электроприводом шаровой мельницы. Выполнено моделирование работы мельницы без нагрузки и при измельчении руды. Результаты моделирования подтверждены инструментальными замерами мощности электродвигателя при различных режимах работы мельницы. Предложенная модель определения потребляемой мощности шаровой мельницы позволяет произвести оценку эффективности потребления электрической энергии электроприводом мельницы и определить качественные показатели систем регулирования при внедрении интеллектуальной системы прогнозирования электропотребления на обогатительной фабрике, контролировать график нагрузки; прогнозировать производственные циклы и пиковые значения энергопотребления; перераспределять нагрузки и анализировать изменения режима работы мельницы.

Ключевые слова: горные машины, электропотребление, анализ энергопотребления, горнотехнические условия, измельчение, электропривод, электродвигатель, структурная схема, преобразователь частоты, потребляемая мощность, математическое моделирование, статистические методы.

В современных условиях эффективное использование энергоресурсов в горной промышленности является важной задачей. Особенно остро стоит проблема оптимизации электропотребления, которая включает в себя задачи нормирования, планирования и регулирования электропотребления, организации учета электроэнергии. Решение этой проблемы рассматривается практически на всех уровнях: корпоративный; отраслевой; национальной экономики; экономического союза; мировой экономики [1–12, 14, 15, 17–33, 35–41, 45, 52]. Горная отрасль не стала исключением, и экспертам приходится учитывать специфику горных предприятий в разработке и адаптации новых технологий энергосбережения к условиям отрасли.

Специфические показатели энергетических характеристик для машинного оборудования горнодобывающей промышленности требуют специальной методики нормирования и анализа электропотребления с использованием математической статистики и теории вероятностей. В более ранних исследованиях определены энергетические

характеристики энергоемких механизмов горной промышленности, выполнен анализ факторов, которые влияют на расход электрической энергии, и произведена оценка степени их влияния на электропотребление [43, 44, 50].

Потребление электроэнергии в горной промышленности зависит от множества горнотехнологических факторов, большинство из которых в настоящее время не учитывается при анализе и планировании на всех уровнях. В связи с этим необходимо установление взаимосвязей между технологическими и энергетическими режимами производственных процессов. При этом во многих случаях оптимальным режимам электропотребления соответствует максимальная производительность технологического оборудования с минимальными удельными расходами электроэнергии. Поэтому интенсификация производственных процессов и улучшение их организации почти всегда обуславливают экономию электроэнергии. В этом смысле удельный расход электроэнергии представляет собой обобщающий показатель



технико-экономического уровня производства в целом. Основным фактором, влияющим на электропотребление, является производительность. Характер изменения электрической нагрузки потребителей предприятий определяется технологическими режимами работы установок и представляется графиками нагрузок. Режимы работы потребителей на предприятиях зависят от многих факторов, определяющих технологический процесс производства, что, в свою очередь, оказывает решающее влияние на потребление электроэнергии электроприемниками.

Установление закономерностей электропотребления для энергоемких установок и технологических переделов от производственных факторов является первоочередной задачей при анализе, нормировании и планировании расхода электроэнергии, а также для оптимизации режима потребления энергии. При этом достоверность и точность результатов, полученных на этом этапе, в значительной мере определяют обоснованность плановых расчетов и экономических показателей производства в целом. Для создания методического инструмента при обосновании управленческих решений и автоматизации процесса их подготовки на горных предприятиях необходимо внедрение информационно-моделирующих систем анализа электропотребления.

Построение информационно-моделирующей системы, возможности которой позволяют решить намеченный круг задач, должно осуществляться на основе концепции единства методического, программного, информационного, технического и организационного обеспечения.

Информационно-моделирующая система электропотребления должна включать в себя обширный банк данных энерготехнологических и производственных показателей предприятия, в ней должны быть

предусмотрены возможности агрегирования и разверстки информации, а также аппарат заполнения отсутствующей информации ее экспертно-оценочными значениями, должен быть адаптируем к технологической системе любой структуры (энергоустановка, технологический передел, предприятие).

Для объективного обоснования принимаемых решений необходимы заблаговременные оценки их возможных и наиболее вероятных результатов, поэтому одной из главных задач при формировании планов и их нормативной базы является подготовка прогнозов. При перспективном планировании электропотребления в составе информации непременно используются прогнозные значения производственных показателей, поэтому основным методом для определения будущих значений расхода электроэнергии является метод многофакторного регрессионного моделирования. Обычно он дает хорошие результаты, если изменения расхода электроэнергии и механизм формирования ее значения устойчивы и сохраняются в планируемом периоде.

Анализ энергопотребления предприятия, проводимый системой, дает возможность прогнозировать электропотребление, разрабатывать рекомендации по формированию политики технического перевооружения, рассчитывать как плановые, так и фактические удельные расходы электроэнергии при отклонении технологических параметров от плановых, указывая при этом, какие факторы повлияли на изменение удельных расходов.

Измельчение полезных ископаемых – это один из наиболее важных процессов в обогащении и перерабатывающей промышленности. Обогащительное производство является самым энергоемким. Анализ энерготехнологических данных показал, что для обогащительных фабрик наблюдается постоянное увеличение



удельных расходов электроэнергии, что связано с уменьшением содержания полезного компонента в руде [48–50].

Мощность, потребляемая электродвигателем мельницы, зависит от производительности, шаровой загрузки, крупности исходного и конечного продукта, типа и состояния футеровки и других факторов руде [49].

В данной работе для определения мощности привода мельниц используется математическое моделирование в среде MatLab.

Структурная схема электропривода мельницы с преобразователем частоты и возбудителем представлена на рис. 1 [51].

Данная структурная схема фактически является моделью электропривода для программы MatLab. Таким образом, зная параметры преобразователя частоты, тиристорного возбудителя и синхронного двигателя, можно смоделировать процессы пуска и втягивания в синхронизм синхронного

электродвигателя, а также исследовать работу электропривода при различных режимах загрузки. В момент времени $t = 0$ с тиристорный возбудитель отключен от двигателя. Двигатель запитан от преобразователя. В момент времени $t = 20$ с (уставка реле времени реальной системы) осуществляется подключение электродвигателя к сети и подается возбуждение на ротор двигателя. Нарастание тока возбуждения осуществляется в функции скольжения двигателя. Двигатель втягивается в синхронизм [13, 16, 34].

При математическом описании синхронной машины используются общепринятые допущения и ограничения, а именно:

- магнитная система машины не насыщена; потери в стали отсутствуют;
- фазные обмотки машины симметричны и сдвинуты строго на 120° (для трехфазных машин);

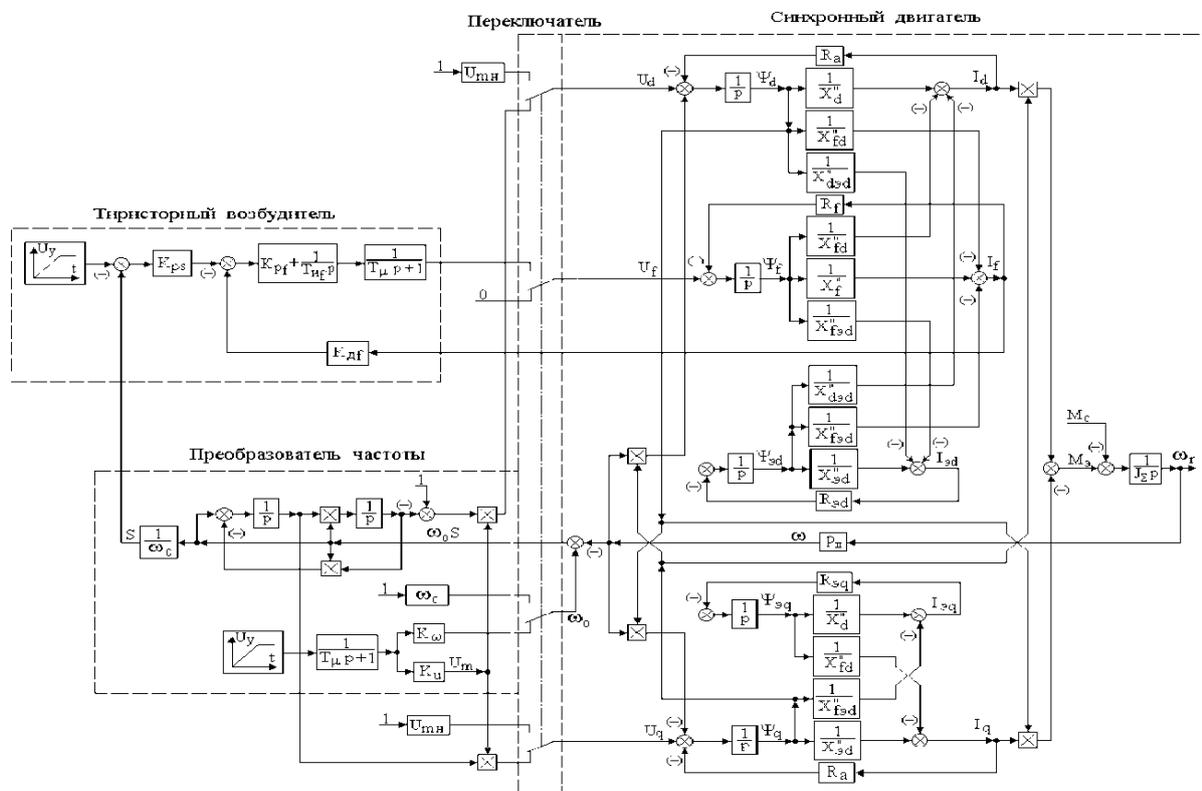


Рис. 1. Структурная схема электропривода



– магнитодвижущие силы обмоток и магнитные поля распределены вдоль окружности воздушного зазора по синусоидальному закону;

– величина воздушного зазора постоянна;

– ротор машины симметричен;

– реальная распределенная обмотка заменена эквивалентной сосредоточенной, создающей ту же магнитодвижущую силу.

Преобразователь частоты, реализующий закон управления

$$U_m / \omega_c = \text{const},$$

может быть представлен в виде двух консервативных звеньев с переменными коэффициентами, на выходе которых получаются гармонические сигналы с переменной частотой и с единичной амплитудой. Передаточные функции этих звеньев имеют вид:

$$W_1(p) = \frac{(\omega_c - \omega)^2}{p^2 + (\omega_c - p_n \omega)^2};$$

$$W_2(p) = \frac{(\omega_c - \omega)p}{p^2 + (\omega_c - p_n \omega)^2},$$

где p – оператор Лапласа.

На выходе этих звеньев включаются два усилительных звена с переменным коэффициентом усиления, пропорциональным амплитудному значению выходного

напряжения преобразователя частоты U_m . Переменные коэффициенты реализуются с помощью блоков умножения. Задающее воздействие преобразователя частоты может быть представлено в виде задатчика интенсивности, представляющего собой интегрирующее звено, на входе которого присутствует единичный входной сигнал, а на выходе – единичное ограничение. Такая математическая модель реализует идеальный преобразователь частоты, то есть преобразователь частоты с гармоническим выходом без учета высших гармонических составляющих. Поскольку выбранный преобразователь частоты оснащен системой широтно-импульсной модуляции выходного напряжения такое допущение можно считать оправданным. Структурная схема, реализующая идеальный преобразователь частоты с гармоническим выходом, приведена на рис. 2.

Тиристорный возбудитель может реализовывать различные алгоритмы управления. В данной схеме выбран алгоритм управления по току возбуждения и по скольжению синхронного двигателя. Контур регулирования тока возбуждения синхронного двигателя выполнен с ПИ-регулятором. Структурная схема контура регулирования тока возбуждения представлена на рис. 3.

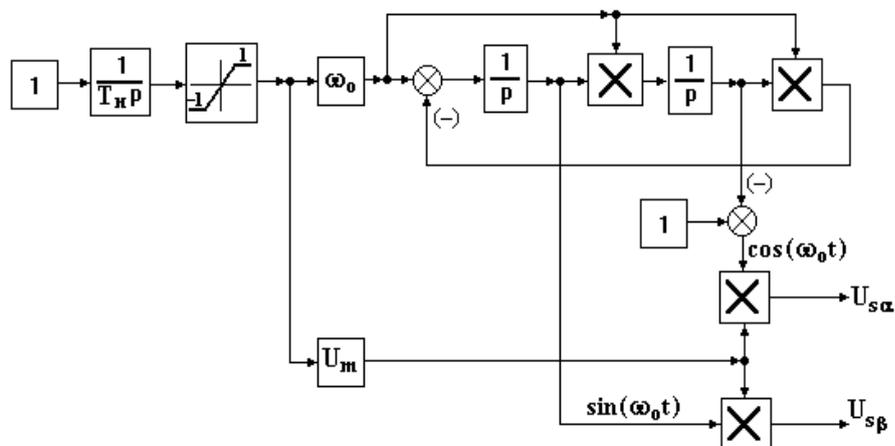


Рис. 2. Структурная схема преобразователя частоты

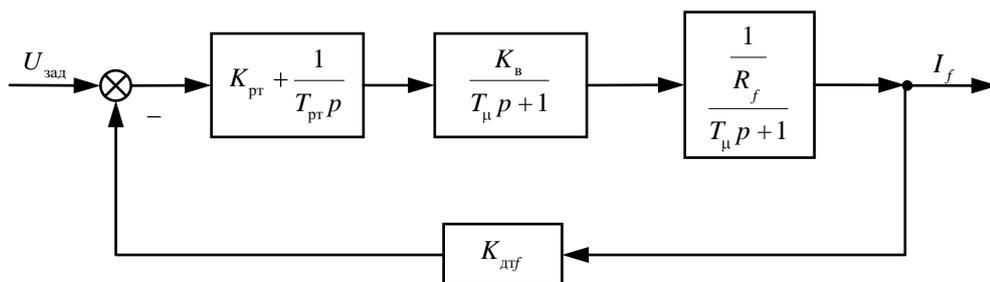


Рис. 3. Структурная схема контура регулирования тока возбуждения

Коэффициент усиления ПИ-регулятора тока возбуждения при настройке контура регулирования тока по критерию технического (модульного) оптимума должен быть равен

$$k_{пр} = \frac{X_f}{2T_{\mu} k_{в} k_{дтф} \omega_c},$$

где $T_{\mu} = 0,01$ с – постоянная времени тиристорного возбудителя;

$k_{в}$ – коэффициент усиления тиристорного возбудителя;

$k_{дтф}$ – коэффициент усиления датчика тока возбуждения синхронного двигателя.

Постоянная времени интегрирования ПИ-регулятора тока возбуждения должна быть равна

$$T_{пр} = \frac{2T_{\mu} k_{в} k_{дтф}}{R_f}.$$

В этом случае обеспечивается полная компенсация электромагнитной инерционности цепи возбуждения синхронного двигателя, поскольку соблюдается условие

$$k_{пр} T_{пр} = \frac{X_f}{\omega_c R_f} = T_f,$$

где T_f – электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения синхронного двигателя.

При такой настройке в контуре действует только малая эквивалентная постоянная времени тиристорного возбудителя T_{μ} , определяемая запаздыванием системы импульсно-фазового управления СИФУ.

Передаточная функция контура регулирования тока возбуждения синхронного двигателя, настроенного по критерию технического оптимума, имеет вид

$$W_{пртф}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} k_{дтф}.$$

Контур регулирования скольжения синхронного двигателя выполнен с П-регулятором и также настраивается по критерию технического оптимума. Структурная схема контура регулирования скольжения представлена на рис. 4.

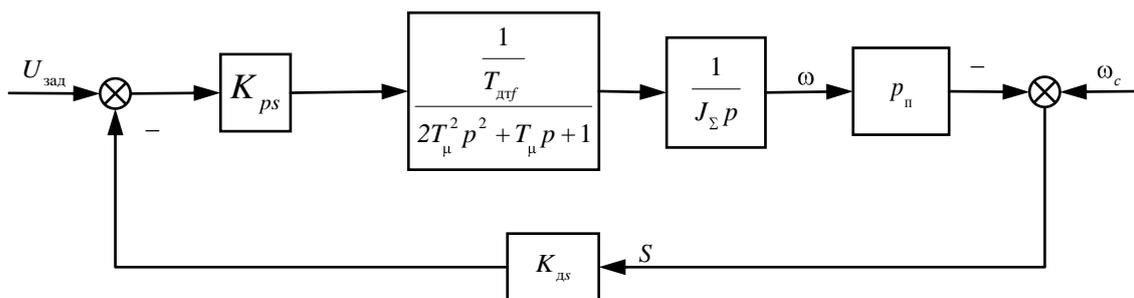


Рис. 4. Структурная схема контура регулирования скольжения



Коэффициент усиления П-регулятора скорости при настройке контура регулирования тока по критерию технического оптимума должен быть равен:

$$k_{ps} = \frac{k_{дтг} J_{\Sigma}}{4T_{\mu} k_{дс}}$$

При такой настройке в системе действует только малая эквивалентная постоянная времени тиристорного возбудителя T_{μ} .

Передаточная функция контура регулирования скольжения синхронного двигателя, настроенного по критерию технического оптимума, имеет вид:

$$W_{ps}(p) = \frac{1}{8T_{\mu}^3 p^3 + 8T_{\mu}^2 p^2 + 4T_{\mu} p + 1} k_{дс}$$

Поскольку при частотном пуске синхронного двигателя частота питающего

напряжения изменяется, в структурную схему подставлялись числовые значения не индуктивных сопротивлений, а индуктивностей обмоток в соответствии с выражением

$$L = \frac{X}{2\pi f_c}$$

В программе MatLab (среда Simulink) составлена схема на основе структурной схемы системы ПЧ-СД и представлен график изменения потребляемой мощности синхронного электродвигателя шаровой мельницы при различных режимах работы (рис. 5).

Результаты математического моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными, снятыми прибором AR-5 (рис. 6), и показали адекватность разработанной модели.

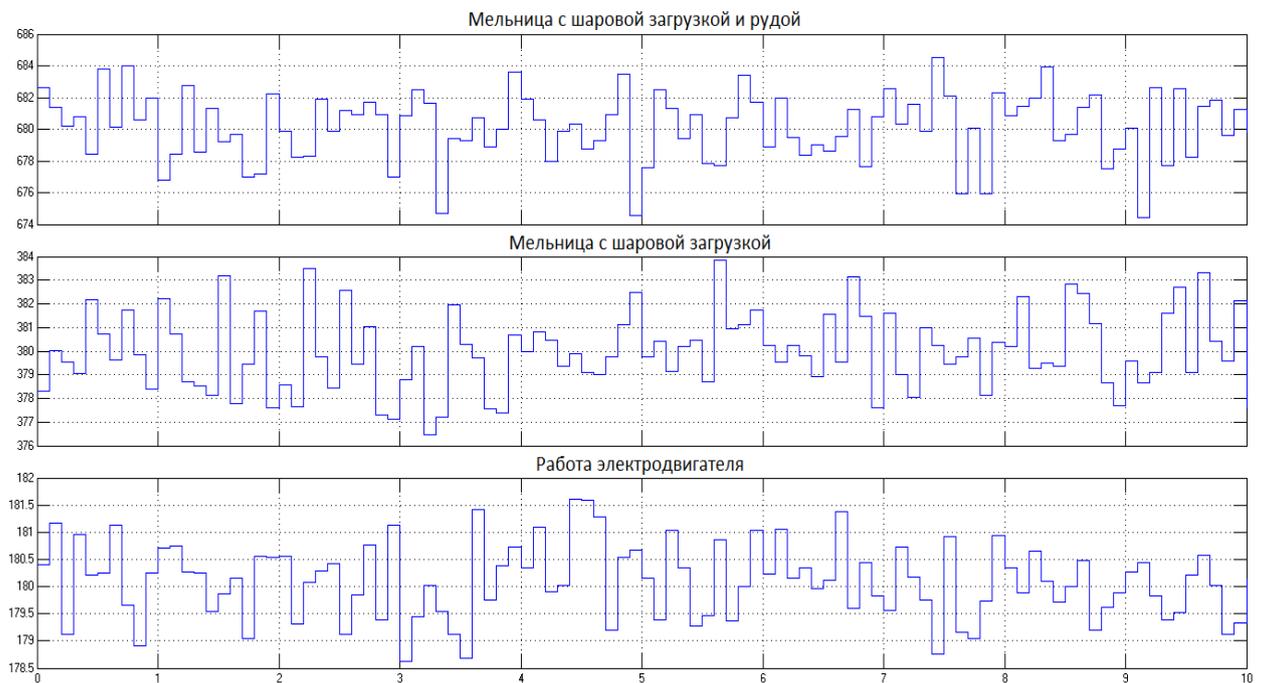


Рис. 5. Мощность электродвигателя шаровой мельницы, кВт



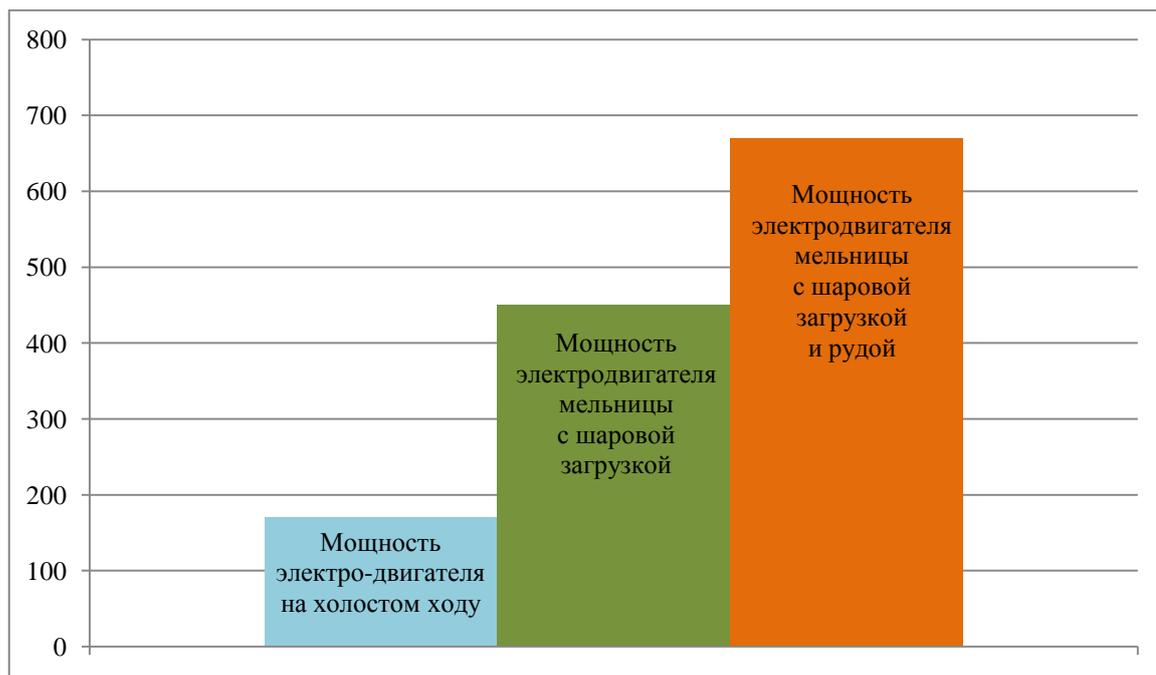


Рис. 6. Мощность электродвигателя мельницы по экспериментальным данным, кВт

Заключение

Предложенная модель определения потребляемой мощности шаровой мельницы позволяет произвести оценку эффективности потребления электрической энергии электроприводом мельницы и определить качественные показатели систем регулирования при внедрении интеллектуальной системы прогнозирования [42, 46] электропотребления на обогатительной фабрике, контролировать график нагрузки; прогнозировать производственные циклы и пиковые значения энергопотребления; перераспределять нагрузки и анализировать изменения режима работы мельницы.

Библиографический список

1. Austin L. G. Klimpel R. R., Luckie P. T. and Rogers R. S. C., (1982), Simulation of grinding circuits for design, Design and Installation of Comminution Circuits, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc, New Jersey, 1982, Editor; Mular, A. L., Jergensen, G. V., Chapter 19, pp. 301-324.
2. Austin L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T. (1984), Process engineering of size reduction: ball milling, American Institute of Mining, Metallurgical

- and Petroleum Engineers Inc, New Jersey, 1984, pp. 1-556.
3. Bbosa LS, Govender I, Mainza AN, et al. Power draw estimations in experimental tumbling mills using PEPT. Miner Eng 2011; 24: 319–324
4. Bbosa, L., Mainza, A., Govender, I. A probability based model for the power draw of a tumbling mill (2014) IMPC 2014 - 27th International Mineral Processing Congress.
5. Bbosa, L.S., Govender, I., Mainza, A. Development of a novel methodology to determine mill power draw (2016) International Journal of Mineral Processing, 149, pp. 94-103. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.02.009
6. BCS, Inc. 2002. Mining industry of the future, Energy and environmental profile of the U.S mining industry, U.S Department of Energy.
7. Cawley, J.C. Electrical accidents in the mining industry, 1990-1999 (2003) IEEE Transactions on Industry Applications, 39 (6), pp. 1570-1577. DOI: 10.1109/TIA.2003.818963
8. Cawley, J.C. Electrical accidents in the mining industry, 1990-1999 (2001) Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2, pp. 1361-1368.
9. Cawley, J.C., Homce, G.T. Protecting miners from electrical arcing injury (2007) Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), art. no. 4347962, pp. 1373-1380. DOI: 10.1109/IAS.2007.213
10. China ERI Analysis of Ministry of Industry and Information, industrial associations and China Statistical Yearbook 2015, China Energy Research



- Institute of the National Development and Reform Commission, (2016). Beijing.
11. Cleary PW and Morrison RD. Particle methods for modelling in mineral processing. *Int J Comput Fluid D* 2009; 23: 137–146.
12. Diao, J., Zhang, G., Hu, H., Zou, Z., Zhang, B. Design and application of electrical fire monitoring system in mining industry (2015) *International Journal of Mining Science and Technology*, 25 (2), art. no. 484, pp. 305–310. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.021
13. Driss Yousfi. Efficient Sensorless PMSM Drive for Electric Vehicle Traction Systems / Driss Yousfi, Elbacha Abdelhadi, Abdellah Ait Ouahman // *Electric Vehicles – Modelling and Simulations* / Dr. Seref Soylu (Ed.). – 2011. – <http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations/efficient-sensorless-pmsm-drive-for-electric-vehicle-traction-systems>.
14. Erdem A. S. 2002, Modelleme yardımıyla kamaralı bilyalı değirmen tasarımı ve tane boyu dağılımlarının belirlenmesi, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Mühendislik Tezi, 2002.
15. Fawkes, S. *Energy Efficiency*. Farnham. Gower Publishing. 2013.
16. Gieras J.F., Piech Z.J. *Linear Synchronous Motors*. CRS Press. 2000.
17. Govender I and Powell MS. An empirical power model derived from 3D particle tracking experiments. *Miner Eng* 2006; 19: 1005–1012.
18. Govender I, McBride AT and Powell MS. Improved experimental tracking techniques for validating discrete element method simulations of tumbling mills. *Exp Mech* 2004; 44: 593–607.
19. Govender I, Powell MS and Nurick GN. Automated imaging to track the 3D motion of particles. *Exp Mech* 2002; 42: 153–160.
20. Hu G, Otaki H and Watanuki K. Motion analysis of a tumbling ball mill based on non-linear optimization. *Miner Eng* 2000; 13: 933–947
21. IEA (2015), *World Energy Outlook 2015*, OECD Publishing, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/weo-2015-en>
22. IEA (International Energy Agency) (2016a), “World energy balances”, IEA World Energy Statistics and Balances (database), IEA/OECD Publishing, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>.
23. *Japan Guide for Energy Saving for Industrial Factory*. The Energy Saving Center. 2003.
24. Mishra BK and Rajamai RK. Simulation of charge motion in ball mills. Part 2: numerical simulations. *Int J Miner Process* 1994; 40: 187–197.
25. Mishra BK. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: part I—contact mechanics. *Int J Miner Process* 2003; 71: 73–93.
26. Morrell S. (1996), Power draw of wet tumbling mills and its relationship to charge dynamics, part 1: A continuum approach to mathematical modelling of mill power draw, *Transaction of Institute of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 105, January-April 1996, pp. 43–53.
27. Morrell S., Man Y. T. (1997), Using modelling and simulation for the design of full scale ball mill circuits, *Minerals Engineering*, 1997, Volume 10, No. 12, pp. 1311–1327.
28. Nakatani, F. Technologies for energy saving in industrial field (2008) *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 3 (2), pp. 190–198. DOI: 10.1002/tee.20255.
29. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T., (1996), *Mineral comminution circuits their operation and optimisation*, Editor; Napier-Munn, T. J, pp. 1–413.
30. Oung, K. *Energy Management in Business*. Farnham. Gower Publishing. 2013.
31. Rajamani RK, Songfack P and Mishra BK. Impact energy spectra of tumbling mills. *Powder Technol* 2000; 108: 116–121.
32. Rezaeizadeh M, Fooladi M, Powell MS, et al. Experimental observations of lifter parameters and mill operation on power draw and liner impact loading. *Miner Eng* 2010; 23: 1182–1191.
33. Rhodes, A., Skea, J. & Hannon, M. 2014. The Global Surge in Energy Innovation. In *Energies* 2014, 7, pp. 5601–5623.
34. Sensorless PMSM Vector Control with a Sliding Mode Observer for Compressors Using MC56F8013 / Document Number: DRM099, Rev.:2-09/2008 // Freescale Semiconductor web site. – http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM099.
35. Study on Energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry from possible Policy Mechanisms. A report submitted by ICF Consulting Limited Date: 1 December 2015. (https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/151201%20DG%20ENER%20Industrial%20EE%20study%20-%20final%20report_clean_stc.pdf – 1.12.2015).
36. Tchorzewski, J. Development of electric power system from the point of view of safety (2008) *IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Proceedings*, art. no. 4736615, pp. 659–663. DOI: 10.1109/EEEL.2008.4736615
37. Thorpe, D. *Earthscan Expert Guide to Energy Management in Buildings*, Abingdon, Routledge. 2014.
38. Thumann. A., Paul Mehta, D. *Handbook of Energy Engineering*. Lilburn, GA. Fairmont. 2013.



39. Weber, L. Some reflections on barriers to the efficient use of energy. *Energy Policy*. 25(10). pp.833-935. 1997.
40. Zhang, J., Ma, H.-W. Online monitoring and protection system for the arc fault of the mining high-voltage switchgear (2013) *Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control*, 41 (11), pp. 141-145.
41. Zou SY. Types of wear in mining equipment. Report, CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang, China, August 2015.
42. Абрамович Б.Н., Бабанова И.С. Система прогнозирования энергопотребления с применением искусственной нейронной сети. *Горные науки и технологии*. 2016;(2):66-77. DOI:10.17073/2500-0632-2016-2-66-77.
43. Авилов-Карнаухов Б.Н., Зюбровский Л.Г. Метод определения экономических режимов потребления электроэнергии на рудообогатительных фабриках // *Промышленная энергетика*. – 1979. – № 5. – С. 3-4.
44. Белых Б.П., Свердель И.С., Олейников В.К. Электрические нагрузки и электропотребление на горнорудных предприятиях. – М.: Недра, 1971. – 399 с.
45. Закиров Д.К., Кукушкин В.М. Энергопотребление и энергосбережение на предприятиях западного Урала. – Пермь: Изд-во ИПК «Звезда», 1997. – 447 с.
46. Кириллов И.Е., Морозов И.Н. Подход к созданию адаптивной модели технологического процесса с целью осуществления оперативно-предупреждающего управления. // *Труды Кольского научного центра РАН*. – 2014. – № 5 (24). – С. 221-225.
47. Кузнецов Н.М. Анализ электропотребления на горных и обогатительных предприятиях «ОАО Апатит», Горное оборудование и электромеханика», 2007, № 1, С. 44-47.
48. Кузнецов Н.М., Аввакумов В.Н. Прогнозирование электропотребления при производстве апатитового концентрата, *Горный журнал*, 1999, № 9, С.51-52.
49. Кузнецов Н.М., Щуцкий В.И. Рациональное электропотребление на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях. – Апатиты, 1997. – 211 с.
50. Олейников В.К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
51. Терехов В.М., Осипов О.И. «Системы управления электроприводов» – М.: Академия, 2005. – 300 с.
52. Фокин В.М. Ф75 Основы энергосбережения и энергоаудита. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 256 с.

“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2016, No. 4, pp. 50-58

Title:	Modeling of power consumption of ball mill
Author 2	Name&Surname: Nikolai M. Kuznetsov Company: Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences Adress: Russia, 184209, Apatity, Murmansk region, md. Akademgorodok, 21A, Scientific Degree: Candidate of Engineering Science Work Position: Leading Researcher Contacts: kuzn55@mail.ru
Author 2	Name&Surname: Ivan N. Morozov Company: Murmansk Arctic State University Adress: Russia, 183038, Murmansk, Kapitan Egorov Str., 15 Scientific Degree: Candidate of Engineering Science Work Position: Associate Professor Contacts: moroz84@mail.ru
DOI:	10.17073/2500-0632-2016-4-50-58
Abstract:	The possibility of predicting energy consumption for ball mill concentrator when implementing intelligent forecasting system. Compiled model to determine the power consumption of the electric drive of a ball mill. The modeling work mill with no load and during grinding the ore. The simulation results are confirmed by instrumental measurements motor power at various modes of operation of the mill. The proposed model for determining the power consumption of a ball mill allows an assessment of the efficiency of electric energy consumption and electric mills identify qualitative indicators of regulatory systems in the implementation of intellectual electricity forecasting system at the processing plant, to



	control the schedule of load; forecast production cycles and peak power values; redistribute the load and analyze changes in the mill operation.
Keywords:	mining machinery, power consumption, analysis of power consumption, mining conditions, electric drive, grinding, electric motor, block diagram, frequency converter, power consumption, mathematical modeling, statistical methods.
References:	<p>1. Austin L. G. Klimpel R. R., Luckie P. T. and Rogers R. S. C., (1982), Simulation of grinding circuits for design, Design and Installation of Comminution Circuits, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc, New Jersey, 1982, Editor; Mular, A. L., Jergensen, G. V., Chapter 19, pp. 301-324.</p> <p>2. Austin L. G., Klimpel, R. R. and Luckie, P. T. (1984), Process engineering of size reduction: ball milling, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc, New Jersey, 1984, pp. 1-556.</p> <p>3. Bbosa LS, Govender I, Mainza AN, et al. Power draw estimations in experimental tumbling mills using PEPT. Miner Eng 2011; 24: 319–324</p> <p>4. Bbosa, L., Mainza, A., Govender, I. A probability based model for the power draw of a tumbling mill (2014) IMPC 2014 - 27th International Mineral Processing Congress.</p> <p>5. Bbosa, L.S., Govender, I., Mainza, A. Development of a novel methodology to determine mill power draw (2016) International Journal of Mineral Processing, 149, pp. 94-103. DOI: 10.1016/j.minpro.2016.02.009</p> <p>6. BCS, Inc. 2002. Mining industry of the future, Energy and environmental profile of the U.S mining industry, U.S Department of Energy.</p> <p>7. Cawley, J.C. Electrical accidents in the mining industry, 1990-1999 (2003) IEEE Transactions on Industry Applications, 39 (6), pp. 1570-1577. DOI: 10.1109/TIA.2003.818963</p> <p>8. Cawley, J.C. Electrical accidents in the mining industry, 1990-1999 (2001) Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), 2, pp. 1361-1368.</p> <p>9. Cawley, J.C., Homce, G.T. Protecting miners from electrical arcing injury (2007) Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society), art. no. 4347962, pp. 1373-1380. DOI: 10.1109/IAS.2007.213</p> <p>10. China ERI Analysis of Ministry of Industry and Information, industrial associations and China Statistical Yearbook 2015, China Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission, (2016). Beijing.</p> <p>11. Cleary PW and Morrison RD. Particle methods for modelling in mineral processing. Int J Comput Fluid D 2009; 23: 137–146.</p> <p>12. Diao, J., Zhang, G., Hu, H., Zou, Z., Zhang, B. Design and application of electrical fire monitoring system in mining industry (2015) International Journal of Mining Science and Technology, 25 (2), art. no. 484, pp. 305-310. DOI: 10.1016/j.ijmst.2015.02.021</p> <p>13. Driss Yousfi. Efficient Sensorless PMSM Drive for Electric Vehicle Traction Systems / Driss Yousfi, Elbacha Abdelhadi, Abdellah Ait Ouahman // Electric Vehicles – Modelling and Simulations / Dr. Seref Soylu (Ed.). – 2011. – http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations/efficient-sensorless-pmsm-drive-for-electric-vehicle-tractionsystems.</p> <p>14. Erdem A. S. 2002, Modelleme yardımıyla kamaralı bilyalı değirmen tasarımı ve tane boyu dağılımlarının belirlenmesi, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Mühendislik Tezi, 2002.</p> <p>15. Fawkes, S. Energy Efficiency. Farnham. Gower Publishing. 2013.</p> <p>16. Gieras J.F., Piech Z.J. Linear Synchronous Motors. CRS Press. 2000.</p> <p>17. Govender I and Powell MS. An empirical power model derived from 3D particle tracking experiments. Miner Eng 2006; 19: 1005–1012.</p> <p>18. Govender I, McBride AT and Powell MS. Improved experimental tracking techniques for validating discrete element method simulations of tumbling mills. Exp Mech 2004; 44: 593–607.</p> <p>19. Govender I, Powell MS and Nurick GN. Automated imaging to track the 3D motion of particles. Exp Mech 2002; 42: 153–160.</p> <p>20. Hu G, Otaki H and Watanuki K. Motion analysis of a tumbling ball mill based on non-linear optimization. Miner Eng 2000; 13: 933–947</p>



21. IEA (2015), World Energy Outlook 2015, OECD Publishing, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/weo-2015en>
22. IEA (International Energy Agency) (2016a), “World energy balances”, IEA World Energy Statistics and Balances (database), IEA/OECD Publishing, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/data-00512-en>.
23. Japan Guide for Energy Saving for Industrial Factory. The Energy Saving Center. 2003.
24. Mishra BK and Rajamai RK. Simulation of charge motion in ball mills. Part 2: numerical simulations. Int J Miner Process 1994; 40: 187–197.
25. Mishra BK. A review of computer simulation of tumbling mills by the discrete element method: part I—contact mechanics. Int J Miner Process 2003; 71: 73–93.
26. Morrell S. (1996), Power draw of wet tumbling mills and its relationship to charge dynamics, part 1: A continuum approach to mathematical modelling of mill power draw, Transaction of Institute of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 105, January-April 1996, pp. 43-53.
27. Morrell S., Man Y. T. (1997), Using modelling and simulation for the design of full scale ball mill circuits, Minerals Engineering, 1997, Volume 10, No. 12, pp. 1311-1327.
28. Nakatani, F. Technologies for energy saving in industrial field (2008) IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 3 (2), pp. 190-198. DOI: 10.1002/tee.20255.
29. Napier-Munn T. J., Morrell S., Morrison R. D., Kojovic T., (1996), Mineral comminution circuits their operation and optimisation, Editor; Napier-Munn, T. J, pp. 1-413.
30. Oung, K. Energy Management in Business. Farnham. Gower Publishing. 2013.
31. Rajamani RK, Songfack P and Mishra BK. Impact energy spectra of tumbling mills. Powder Technol 2000; 108: 116–121.
32. Rezaeizadeh M, Fooladi M, Powell MS, et al. Experimental observations of lifter parameters and mill operation on power draw and liner impact loading. Miner Eng 2010; 23: 1182–1191.
33. Rhodes, A., Skea, J. & Hannon, M. 2014. The Global Surge in Energy Innovation. In Energies 2014, 7, pp. 5601-5623.
34. Sensorless PMSM Vector Control with a Sliding Mode Observer for Compressors Using MC56F8013 / Document Number: DRM099, Rev.:2-09/2008 // Freescale Semiconductor web site. – http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM099.
35. Study on Energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry from possible Policy Mechanisms. A report submitted by ICF Consulting Limited Date: 1 December 2015. (https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/151201%20DG%20ENER%20Industrial%20EE%20study%20-%20final%20report_clean_stc.pdf – 1.12.2015).
36. Tchorzewski, J. Development of electric power system from the point of view of safety (2008) IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, Proceedings, art. no. 4736615, pp. 659-663. DOI: 10.1109/EEEL.2008.4736615
37. Thorpe, D. Earthscan Expert Guide to Energy Management in Buildings, Abingdon, Routledge. 2014.
38. Thumann. A., Paul Mehta, D. Handbook of Energy Engineering. Lilburn, GA. Fairmont. 2013.
39. Weber, L. Some reflections on barriers to the efficient use of energy. Energy Policy. 25(10). pp.833-935. 1997.
40. Zhang, J., Ma, H.-W. Online monitoring and protection system for the arc fault of the mining high-voltage switchgear (2013) Dianli Xitong Baohu yu Kongzhi/Power System Protection and Control, 41 (11), pp. 141-145.
41. Zou SY. Types of wear in mining equipment. Report, CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang, China, August 2015.
42. Abramovich B.N., Babanova I.S. Sistema prognozirovanija jenergopotreblenija s primeneniem iskusstvennoj nejronnoj seti [*System for forecasting energy consumption using the artificial neural network*]. Mining science and technology. 2016;(2):66-77. DOI:10.17073/2500-0632-2016-2-66-77.
43. Avilov-Karnauhov B.N., Zjubrovskij L.G. Metod opredelenija jekonomichnyh rezhimov potreblenija jelektrojenergii na rudoobogatitel'nyh fabrikah [*Method for determination of economical modes of energy consumption in the ore-dressing plants*] Industrial power. – 1979. – No. 5. – Pp. 3–4.



44. Belyh B.P., Sverdel' I.S., Olejnikov V.K. Jelektricheskie nagruzki i jelektropotreblenie na gornorudnyh predpriyatijah. [*The electrical load and power consumption at the mining enterprises.*] – M.: Nedra, 1971. – 399 p.
45. Zakirov D.K., Kukushkin V.M. JenerGOPotreblenie i jenerGosberezhenie na predpriyatijah zapadnogo Urala. [*Energy consumption and energy saving at the enterprises of the Western Urals.*] – Perm: Publishing house of the IPK "Zvezda", 1997. – 447 p.
46. Kirillov I.E., Morozov I.N. Podhod k sozdaniju adaptivnoj modeli tehnologicheskogo processa s cel'ju osushhestvlenija operativno-preduprezhdajushhego upravlenija. [*The approach to the creation of adaptive model of the process for the implementation of operational and proactive management*] Proceedings of the Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences. – 2014. – No. 5 (24). – Pp. 221-225.
47. Kuznecov N.M. Analiz jelektropotreblenija na gornyh i obogatitel'nyh predpriyatijah «OAO Apatit». [*Analysis of energy consumption in the mining and processing enterprise "Apatite OJSC"*] Gornoe Mining Machinery and Electromechanics, 2007, No. 1, Pp. 44-47.
48. Kuznecov N.M., Avvakumov V.N. Prognozirovanie jelektropotreblenija pri proizvodstve apatitovogo koncentrata. [*Prediction of electricity consumption in the production of apatite concentrate*] Mining Journal, 1999, No. 9, pp.51-52.
49. Kuznecov N.M., Shhuckij V.I. Racional'noe jelektropotreblenie na gornodobyvajushhih i gorno-obogatitel'nyh predpriyatijah. [*Efficient power consumption in the mining and ore-dressing plants.*] – Apatity, 1997. – 211 p.
50. Olejnikov V.K. Analiz i planirovanie jelektropotreblenija na gornyh predpriyatijah. [*Analysis and planning of electricity in mining enterprises*] – M.: Nedra, 1983. – 192 p.
51. Terehov V.M., Osipov O.I. Sistemy upravlenija jelektroprivodov [*Systems management drives*] – M.: Akademiya, 2005. – 300 p.
52. Fokin V.M. F75 Osnovy jenerGosberezhenija i jenerGoaudita. [*Fundamentals of energy saving and energy audit.*] – M.: "Publisher Engineering 1", 2006. – 256 p.

