

УДК 621.926:534.16

M.O. Alekseyev, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
Faris Sameer Rasmi Alkhori

State Higher Educational Institution "National Mining University", Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: AlekseevM@nmu.org.ua

## AUTOMATED CONTROL OF ORE-PEBBLE MILL CHARGE BY THE SIGNAL OF ACTIVE POWER OF MAGNETIC SEPARATOR ELECTRIC MOTOR

М.О. Алексєєв, д-р техн. наук, проф.,  
Фаріс Самір Расмі Альхорі

Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет", м.Дніпропетровськ, Україна,  
e-mail: AlekseevM@nmu.org.ua

## АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ РУДНОГАЛЬКОВОГО МЛИНА РУДОЮ НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛУ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА

**Purpose.** Scientific justification for automated control method of optimal charge of pebble mill operating in series with a magnetic separator in the second stage of crushing in magnetic separating plants that process on iron ores with varying physical and mechanical properties.

**Methodology.** The research involved mathematical modeling of technological complex of pebble crushing and magnetic separation by means of usage of proven adequate models of the processes of grinding, magnetic separation, regularities of generation of active power signal of electric motors of mill and magnetic separator, analysis of static characteristics of the complex obtained by computer simulations and the development of automated control method for pebble mill optimal charge with magnetic ore with varying physical and mechanical properties.

**Findings.** Some new regularities of generation of static characteristics of the technological systems of pebble crushing and magnetic separation were obtained. The method for automated control of optimal ore charge of pebble mills taking into account the properties of processed iron ore was developed.

**Originality.** Sign of the first derivative of active power signal of the magnetic separator motor by the signal of active power of pebble mill motor determines the direction of change in ore mill charge. If the sign is positive, the mill is underused and productivity by ore on inlet of mill should be increased, and if the sign is negative, the mill is overloaded and productivity by ore on the inlet should be reduced. We have found that the sign of the coefficient of correlation between the signals of the active power of electric motors of the magnetic separator and the pebble mill determines the charge degree of mill by ore. If the sign is positive, the mill is underused, and if the sign is negative, the mill is overloaded. The lack of correlation between these signals is a sign of the optimum charge degree of the pebble mill with ore.

**Practical value.** The method and the functional diagram were developed for the automated control of the charge degree of pebble mill with ore considering the influence of the physical and mechanical properties of iron ore on the charging, which allow to improve the quality of the concentrate; to reduce ore overgrinding and iron losses in the tailings; to increase productivity of ore magnetic separating factories; and to reduce equipment downtime.

**Keywords:** *automated control, drum mill, magnetic enrichment, ore mills charging*

**Statement of problem.** Maximum performance of technological complex of second stage of iron ore magnetic separation is determined by pebble mill optimum charging. The magnitude of the pebble mill optimum charging with ore determines the maximum performance of the complex by magnetic product. The magnitude of the optimum charging is variable and is determined by the physical-mechanical properties of ore such as grain size, hardness, mass fraction of iron, iron mineral dissemination. So far, there are no methods of automated control of tumbling mills optimum charging with ore. We still have no regularities of formation of static characteristics of technological complexes of second stage of pebble grinding of iron ore magnetic separation.

**Analysis of studies and publications.** The works dedicated to tumbling mills automation focus on control and regulation of the ore mills charging degree. This problem is solved separately for tumbling mills excluding the impact of ore mills charging degree on the mode and efficiency of the apparatus of further processing. There are methods and systems for automatic control of ore mills filling based on sound-ranging signal as well as on active power signal of tumbling mill motor. The work [1] offers methods and systems for ore mills charging control based on sound-ranging signal as well as methods of spectral analysis of active power signal and selection of informative part of mill motor active power signal. The disadvantage of the described methods is the lack of consideration of physical and mechanical properties of enriched ore. These methods provide the best performance of the mill by

grain-size class 0,074 mm and do not exclude overgrinding of largely-ingrained ore or undergrinding of disseminated ore. The methods do not consider effective mode of further ore processing by magnetic separator. There is no information about the static characteristics of the complex "pebble grinding - magnetic separation".

Consequently, for the time being, there are no scientifically proven approaches to the automatic control of optimum pebble mills charging with ore, working in tandem with magnetic separators.

**Unresolved problems.** Scientific problem consists in the establishment of the regularities of formation of static characteristics of technological complexes of pebble grinding in framework of iron ore magnetic separation process for the purpose of automated control of pebble mill optimum charging by active power signals of electric motors of magnetic separator and mill. The solution to this problem allows: to develop system of automated control of pebble mill optimum charging; to disclose ore with variable properties to the desired grind size; and to provide maximum performance of the complex by magnetic product. Improvement of technical and economic indicators of iron ore enrichment also can be provided.

**Problem definition.** To solve the problem it is necessary to develop a mathematical model of technological complex "pebble grinding - magnetic separation". It is also essential to perform computer modeling of the complex and to find the static characteristics of the complex in order to establish functional diagram of the system for automated control of pebble mill optimum charging by active power signals of the electric motors of magnetic separator and mill.

**The main part of the article.** In National Mining University the scientific basis is developed for application of industrial magnetic separator as a natural power analyzer of ore disclosure and energy-saving regime of ore grinding in mill. In research [2] it is shown that the maximum active power of separator drum motor corresponds to the maximum performance of the complex of magnetic separation by extracted magnetic iron and it is also complies with minimum of specific consumption of electricity.

For the complex analysis of the processes of ore magnetic enrichment the mathematical model of technological complex of magnetic separation was developed. The model shown in Fig. 1 include: models of grinding and magnetic separation, model of ore disclosure, models of formation of active power of drive motors of mill and magnetic separator.

Dependence of the active power consumed by the drive motor of grinding mill on design and technological factors, obtained in [3]

$$P_m = 6,54 \cdot \omega \cdot \gamma_p \frac{(R^2 + \rho^2)^2}{f^2 + 1} \left[ \frac{\omega^2 \xi (\sqrt{R^2 - \rho^2} + f \cdot \rho)}{g} + f \cdot \sqrt{(1 + f^2)^2 - \frac{\omega^4 \cdot \xi^2}{g^2} (\sqrt{R^2 - \rho^2} + f \cdot \rho)^2} \right],$$

where  $R$  is the radius of the grinding mill drum;  $\omega$  is the angular rate of rotation of the mill;  $\rho$  is radius of

mill filling with ore;  $f$  is coefficient of friction;  $\gamma_p$  is density of pulp in the mill;  $\xi$  is the coefficient of ore layers sliding in mill drum;  $g$  is gravity acceleration.

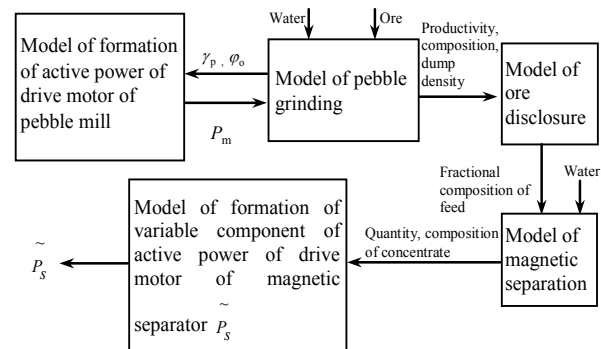


Fig. 1. Scheme of mathematical model of technological complex of magnetic separation where  $\gamma_p$  is density of pulp in the mill;  $\phi_o$  is the degree of the mill filling with ore;  $P_m$  is active power of engine of ore grinding mill;  $P_s$  is the variable component of active power of engine of magnetic separator

The work [1] contains the analytical dependence obtained for connection between the power necessary to bring intramill load to operating condition and power expended directly on the grinding process. The grinding process is expressed by the Rittinger equation

$$\frac{6}{\gamma_o} \cdot \left( \frac{1}{d_{as2}} - \frac{1}{d_{as1}} \right) \cdot Q = K_R \cdot P_g,$$

where  $d_{as1}$ ,  $d_{as2}$  are the average size of ore at the inlet and outlet of the mill, respectively;  $Q$  is performance by ore at the entrance of the mill;  $P_g$  is active power expended on the grinding process;  $K_R$  is the Rittinger factor;  $\gamma_o$  is density of grinding ore.

Disclosure of minerals is described by the Wigley and Lee random model of disclosure [3]. The model of magnetic separation is described by magnetic permeability of concentrate according to the K. Lihtenekker equation

$$\mu = \mu_m^\alpha,$$

where  $\mu_m$  is the magnetic permeability of magnetite;  $\alpha$  is magnetite content in the condensed product.

In work [2] the dependence of the active power of the drive motor of magnetic separator drum from concentrate characteristics was obtained.

The simulation resulted static characteristics of active power of mill and magnetic separator dependence on the degree of filling. The static characteristics are shown in Fig. 2.

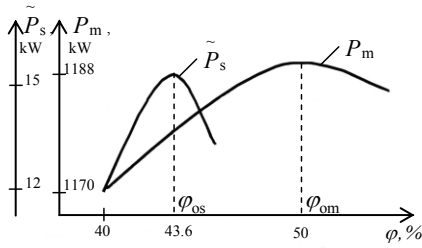


Fig. 2. Static characteristics of active power of electromotors of electric mill and magnetic separator;

where  $P_m$  is the active power of mill motor;  $\tilde{P}_s$  is the variable component of the active power of the motor of the magnetic separator;  $\varphi_{os}$  is optimal filling of mill with ore by criterion of maximum performance by magnetic product;  $\varphi_{om}$  is optimal filling of the mill with ore by criterion of maximum power expended by the mill

The analysis of static characteristics illustrated by Fig. 2 indicates that the maximum active power of motor of the separator complies with the maximum performance of the complex by magnetic product and does not coincide with the maximum of the active power of the driving motor of the mill. The optimal mill filling with ore, which provides maximum performance for the complex by magnetic product  $\varphi_{os}$  is less than optimal filling of the mill with ore  $\varphi_{om}$  which corresponds to the maximum power consumption of the mill. Fig. 2 shows that the optimal filling of the mill with ore can be determined by the sign of the derivative  $\frac{d\tilde{P}_s}{dP_m}$ . If  $\frac{d\tilde{P}_s}{dP_m} > 0$ , the mill is undercharged; and if  $\frac{d\tilde{P}_s}{dP_m} < 0$ , the mill is overcharged.

According to the static characteristics from Fig. 2 the static characteristic of technological complex was drawn (Fig. 3).

The analysis of the characteristics of Fig. 3 shows that increase of ore feed and power consumption in mill (point A) increases the performance of complex by magnetic product. With further increase of ore feed to the mill (point B) the power consumption is also increasing but the performance of complex by magnetic product is falling down, which corresponds to overloading.

The research showed the regularities concerning dependence of static characteristics of the magnetic concentration technological complex on the size of ore on mill input (Fig. 4); on the content of magnetite in the condensed product (Fig. 5); and on the density of the pulp (Fig. 6).

Analysis of the dependences shows that if all disturbing influences on the process of grinding and magnetic separation change, it might be possible to determine the optimal ore mill charging by the sign of the derivative component of the active power signal of magnetic separator motor by active power signal of the driving motor of the mill.

Taking into account the stochastic nature of the active power signal the practical determination of the sign of the derivative by sign of the correlation coefficient between the signals of active power of electromotors of the separator and the mills is possible. Handling the pebble mill charging with ore is produced using automated control and management system. Functional diagram of the system is shown in Fig. 7.

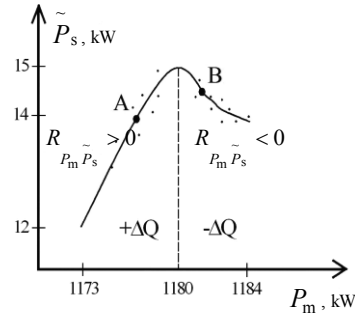


Fig. 3. The static characteristic of the technological complex of magnetic separation, where  $\pm\Delta Q$  is increment of the performance by ore at the entrance of the mill;  $R_{P_m \tilde{P}_s}$  is the correlation coefficient between the signals of active power of electric separator and mills; A is a point of complex undercharge; B is point of complex overcharge

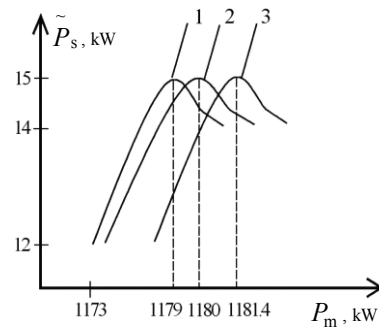


Fig. 4. Dependence of static characteristics on the size of ore  $d$  input: 1 –  $d = 8 \text{ mm}$ ; 2 –  $d = 10 \text{ mm}$ ; 3 –  $d = 12 \text{ mm}$

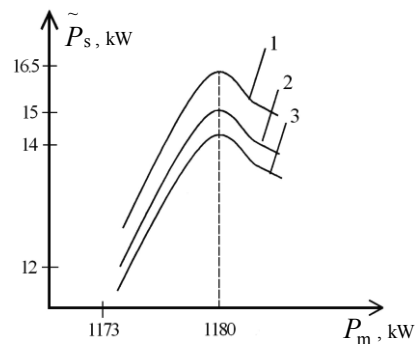


Fig. 5. Dependence of the static characteristics on the magnetite content  $\alpha$  in the condensed product: 1 –  $\alpha = 0.87$ ; 2 –  $\alpha = 0.85$ ; 3 –  $\alpha = 0.83$

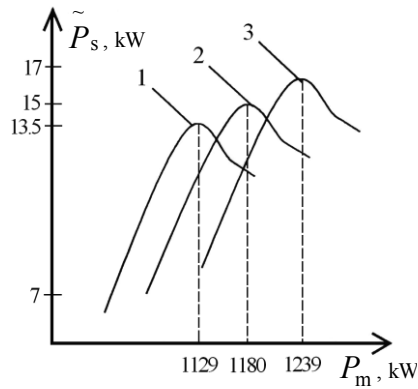


Fig. 6. Dependence of the static characteristics on the pulp density  $\gamma_p$ : 1 –  $\gamma_p = 2.29 \text{ kg/m}^3$ ; 2 –  $\gamma_p = 2.41 \text{ kg/m}^3$ ; 3 –  $\gamma_p = 2.53 \text{ kg/m}^3$ .

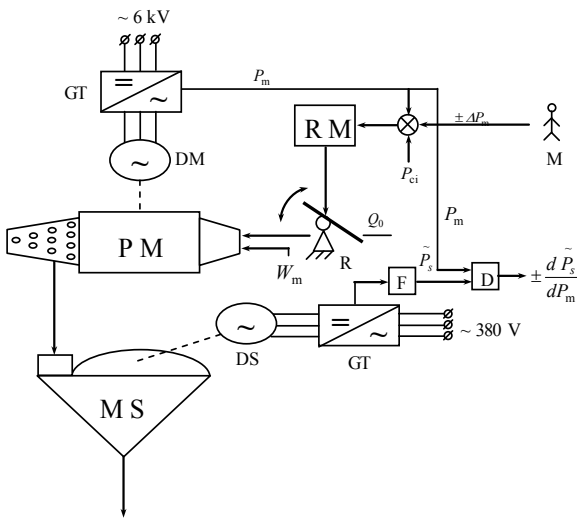


Fig. 7. Functional diagram of system of automated control and management of pebble mill charging: GT is active power generating transducer; DM is electromotor of mill; PM is pebble mill; MS is magnetic separator; RM is regulator of performance by ore on mill inlet; R – regulator; DS is electromotor of separator; M is miller; F is filter of variable component of active power of electromotor of separator; D is differentiator;  $\pm \Delta P_m$  is corrective action on regulator charging by active power signal of mill electromotor;  $P_{ci}$  is control input;  $P_m$  is the active power of the mill engine;  $W_m$  is the water flow in the mill;  $Q_0$  is the performance by ore on the mill inlet

The system of automated control and management of pebble mill charging can operate in one of two algorithms. The first algorithm works on a sign of the derivative of the variable component of active power signal of separator electromotor by active power of mill electromotor.

$$Q = \begin{cases} \text{charge increase: } +\Delta Q; \frac{d\tilde{P}_s}{dP_m} > 0 \\ \text{optimal charge: } \Delta Q = 0; \frac{d\tilde{P}_s}{dP_m} = 0 \\ \text{charge decrease: } -\Delta Q; \frac{d\tilde{P}_s}{dP_m} < 0 \end{cases}$$

where  $\pm \Delta Q$  is an increment of the performance by ore at the entrance of the mill.

The second algorithm of mill charging automated control works on a sign of the correlation coefficient  $R_{P_m \tilde{P}_s}$  between active power signals of electricmotors of magnetic separator and mill

$$Q = \begin{cases} \text{undercharge: } +\Delta Q; R_{P_m \tilde{P}_s} > 0 \\ \text{optimal charge: } \Delta Q = 0; \left| R_{P_m \tilde{P}_s} \right| \leq \delta \\ \text{overcharge: } -\Delta Q; R_{P_m \tilde{P}_s} < 0 \end{cases}$$

where  $\delta$  is a dead band.

**Conclusions.**

1. As a result of modeling of technological complex of pebble grinding and magnetic separation of iron ore the method was developed for automated control of pebble mill optimum charging with ore by the sign of the derivative of variable component of active power of electromotor magnetic separator by active power of mill electromotor. It was identified that when pebble mill is undercharged the sign of the derivative is positive and when pebble mill is overcharged the sign is negative.

2. The method of automated control of the optimum mill charging with ore by sign of the correlation coefficient between the signals of active power of electromotors of electric magnetic separator and mill was proposed. It was identified that when pebble mill is undercharged the sign of the correlation coefficient is positive and when pebble mill is overcharged the sign is negative.

**The prospects for future research** are to develop the method for automated control of ball mill charging with ore.

**References / Список літератури**

1. Mariuta, A.N. (1995), *Avtomaticheskaja optimizatsiia protsessa obogashcheniia rud na magnitoobogatitelnykh fabrikakh* [Automatic Optimization of Magnetic Ore Mills], Nedra, Moscow, Russia.

Марюта А.Н. Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках. / Марюта А.Н. – М.: Недра, 1995. – 230 с.

2. Kochura, Ye.V. (1995), "Investigation of the signal of active power of the motor magnetic separator from a position of control problems", *Obogashchenie rud*, no.4-5, pp. 46-49.

Кочура Е.В. Исследование сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора с

позиции задач управления / Е.В. Кочура // Обогащение руд. – 1994. – № 4–5. – С. 46–49.

3. Lynch, A.J. (2001), *Tsikly drobleniia i izmelcheniia. Modelirovanie, optimizatsiia, proektirovanie i upravlenie* [Cycles of Crushing and Grinding. Modeling, Optimization, Design and Management], Translated by Akselrod, A., Nedra, Moscow, Russia.

Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление / Линч А.Дж.; Перев. с англ. под. ред. А. Аксельрода – М.: Недра, 2001. – 343 с.

4. Mariuta, A.N. (2003), *Friktsionnye kolebaniia v mekhanicheskikh sistemakh* [Friction Vibrations in Mechanical Systems], Nedra, Moscow, Russia.

Марюта А.Н. Фрикционные колебания в механических системах. / Марюта А.Н. – М.: Недра, 2003. – 240 с.

**Мета.** Наукове обґрунтування методу автоматизованого контролю оптимального завантаження рудногалькового млина, що послідовно працює з магнітним сепаратором у другій стадії подрібнення магнітозбагачувальних фабрик залізних руд зі змінними фізико-механічними властивостями.

**Методика.** Математичне моделювання технологічного комплексу рудногалькового подрібнення та магнітної сепарації шляхом використання апробованих адекватних моделей процесів подрібнення, магнітної сепарації, закономірностей формування сигналів активної потужності електродвигунів млина й магнітного сепаратора. Аналіз статичних характеристик технологічного комплексу.

**Результати.** Отримані нові закономірності формування статичних характеристик технологічних комплексів рудногалькового подрібнення та магнітної сепарації. Розроблений метод автоматичного контролю оптимального завантаження рудою рудногалькових млинів, що враховує властивості подрібнюваної й збагачуваної залізної руди.

**Наукова новизна.** Встановлено, що автоматичний контроль оптимального ступеня заповнення рудою барабанного млина, послідовно з'єданого з магнітним сепаратором, здійснюється за екстремумом статичної характеристики залежності спектральної складової активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора, вимірюваної на частоті пульсуючого магнітного поля сепаратора, від активної потужності електродвигуна млина, дозволяє підвищити точність автоматичного контролю оптимального ступеня завантаження рудою барабанного млина з урахуванням змінних фізико-механічних властивостей руди. Знак першої похідної сигналу активної потужності електродвигуна магнітного сепаратора за сигналом активної потужності електродвигуна рудногалькового млина визначає напрям зміни завантаження млина рудою. Якщо знак додатний, то млин недовантажено, а якщо знак від'ємний, то млин перевантажено. Встановлено, що знак коефіцієнта кореляції між сигналами активної потужності електродвигунів магнітного сепаратора та рудногалькового млина ви-

значає ступінь завантаження млина рудою. Якщо знак додатний, то млин недовантажено, а якщо від'ємний – перевантажено. Відсутність кореляції між сигналами є ознакою оптимального ступеня завантаження рудногалькового млина рудою.

**Практична значимість.** Розроблено метод і функціональну схему автоматизованого контролю ступеня завантаження рудногалькового млина рудою з урахуванням впливу на завантаження фізико-механічних властивостей залізної руди, що дозволяє підвищити якість концентрату, зменшити переподрібнення руди та втрати заліза у хвостах, підвищити продуктивність магнітозбагачувальних фабрик, знизити простой устаткування.

**Ключові слова:** автоматизований контроль, барабанні млини, магнітне збагачення, завантаження млинів рудою

**Цель.** Научное обоснование метода автоматизированного контроля оптимальной загрузки рудногальковой мельницы, последовательно работающей с магнитным сепаратором во второй стадии измельчения магнитообогатительных фабрик железных руд с переменными физико-механическими свойствами.

**Методика.** Математическое моделирование технологического комплекса рудногалькового измельчения и магнитной сепарации путем использования апробированных адекватных моделей процессов измельчения, магнитной сепарации, закономерностей формирования сигналов активной мощности электродвигателей мельницы и магнитного сепаратора. Анализ статических характеристик технологического комплекса.

**Результаты.** Получены новые закономерности формирования статических характеристик технологических комплексов рудногалькового измельчения и магнитной сепарации. Разработан метод автоматического контроля оптимальной загрузки рудой рудногальковых мельниц, учитывающий свойства измельчаемой и обогащаемой железной руды.

**Научная новизна.** Установлено, что автоматический контроль оптимальной степени заполнения рудой барабанной мельницы, последовательно соединенной с магнитным сепаратором, осуществляется по экстремуму статической характеристики зависимости спектральной составляющей активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора, измеряемой на частоте бегущего магнитного поля сепаратора, от активной мощности электродвигателя мельницы, что позволяет повысить точность автоматического контроля оптимальной степени загрузки рудой барабанной мельницы с учетом переменных физико-механических свойств руды. Знак первой производной сигнала активной мощности электродвигателя магнитного сепаратора по сигналу активной мощности электродвигателя рудногальковой мельницы определяет направление изменения загрузки мельницы рудой. Если знак положительный, то мельница недогружена, а если отрицательный, то перегружена. Установлено, что знак коэффициента корреляции между сигналами активной мощности электродвига-

телей магнитного сепаратора и рудногалечной мельницы определяет степень загрузки мельницы рудой. Если знак положительный, то мельница недогружена, а если отрицательный – перегружена. Отсутствие корреляции между сигналами является признаком оптимальной степени загрузки рудногалечной мельницы рудой.

**Практическая значимость.** Разработан метод и функциональная схема автоматизированного контроля степени загрузки рудногалечной мельницы рудой с учетом влияния на загрузку физико-механичес-

ких свойств железной руды, что позволяет повысить качество концентрата, уменьшить переизмельчение руды и потери железа в хвостах, повысить производительность магнитообогатительных фабрик, снизить простои оборудования.

**Ключевые слова:** *автоматизированный контроль, барабанные мельницы, магнитное обогащение, загрузка мельниц рудой*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В.Ткачовим. Дата надходження рукопису 07.06.13.*

УДК 629.34:62-235:165.41

**И.А. Таран, д-р техн. наук, доц.,  
И.Ю. Клименко**

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г.Днепропетровск, Украина, e-mail: taran\_70@mail.ru

## ИННОВАЦИОННЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ТРАНСМИССИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**I.A. Taran, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
I.Yu. Klymenko**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: taran\_70@mail.ru

## INNOVATIVE MATHEMATICAL TOOLS FOR BENCHMARKING TRANSMISSIONS OF TRANSPORT VEHICLES

**Цель.** Разработать и апробировать интегральную систему критериев оценки работы бесступенчатых трансмиссий транспортных средств для объективного сравнения альтернативных вариантов. Существующая математическая формализация критериев оптимальности предложена без учета топливной экономичности. Без формализации и трансформации этого важнейшего показателя в интегральный стохастический критерий качества предложенная система критериев не является полной.

**Методика.** Теоретические исследования трансмиссий базируются на основных положениях теории машин и механизмов, теории замкнутых двухпоточных передач.

**Результаты.** В результате исследования, в режиме диалога с компьютером, на основании максимизации критериев по динамическому фактору и к.п.д. трансмиссии, минимизации критериев по тепловыделению и расходу топлива определен рациональный вектор конструктивных параметров для двухпоточной гидрообъемно-механической трансмиссии. Применительно к трансмиссиям шахтного дизелевоза, работающего в относительно стабильном технологическом процессе, предложенная система критериев позволяет: а) определить наиболее рациональное множество конструктивных параметров трансмиссии с точки зрения максимума среднеинтегрального к.п.д.; б) применить на основе известных регулярных методов оптимизации технологию структурного и параметрического синтеза бесступенчатых трансмиссий; в) производить мониторинг альтернативных вариантов схемных решений трансмиссий еще на этапе проектирования и научно обосновано выбирать наиболее эффективную трансмиссию.

**Научная новизна.** За счет уточнения векторов конструктивных варьируемых параметров и предложенного нового интегрального критерия по топливной экономичности усовершенствована система критериев для оценки эффективности работы бесступенчатых трансмиссий шахтных дизелевозов, позволяющая объективно сравнивать основные технико-экономические параметры трансмиссий и определять их рациональные или оптимальные конструктивные параметры.

**Практическая значимость.** Заключается в использовании усовершенствованной системы критериев для обоснования типа трансмиссии, обеспечивающей необходимое тяговое усилие и бесступенчатое регулирование скорости движения дизелевоза в заданном диапазоне при работе дизельного двигателя с постоянной частотой вращения коленвала, обеспечивающей минимальные выбросы и потребление топлива.

**Ключевые слова:** *дизелевоз, трансмиссия, система критериев, конструктивный параметр, критерий качества*

**Введение.** В каждом транспортном средстве, независимо от массово-габаритных характеристик,

типа используемого движителя и функционального предназначения, для трансформации крутящего момента и угловой скорости двигателя применяется трансмиссия. Как при мониторинге и оценке рацио-