

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.3: 622

**АЛГОРИТМ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ РУДОРАЗМОЛЬНОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

М.К. Багдасарян, С.С. Алавердян, А.М. Аветисян

Государственный инженерный университет Армении (Политехник)

Предлагается метод исследования и обнаружения изменений состояния механических передач и приводного двигателя электромеханической системы, обеспечивающий работу рудоразмольной мельницы. В основе метода лежит тот факт, что эти изменения приводят к изменению во времени углов поворота, скорости и ускорения венцевой шестерни, смонтированной на корпус барабана, а также подшипниковой шестерни, соединенной с валом двигателя. Разработан алгоритм, позволяющий путем выбора любого типоразмера барабанной мельницы и соответствующего приводного двигателя оценить рабочее состояние системы мельница-двигатель при изменении жесткости связи между барабаном и электродвигателем, а также количественных и качественных характеристик внутримельничной нагрузки.

Ключевые слова: электромеханическая система, момент сопротивления, барабанная мельница, жесткость связи, коэффициент заполнения.

Введение. Исследование рабочего состояния электромеханических систем с целью обеспечения технологического процесса является первостепенной задачей, так как внеплановый ремонт и наладка оборудования приводят к снижению рентабельности всего производственного процесса. Данная проблема особенно актуальна при использовании современных типов, видов, схем и темпов развития технологических процессов, их автоматизации и комплексной механизации, что, в конечном счете, обеспечивает производство конкурентоспособного продукта.

Учитывая, что производства, использующие процесс измельчения руды, выделяются значительной энергоемкостью, что, в основном, обусловлено применением мощных электромеханических систем, а также имея в виду, что данный процесс является основным в производстве металлических концентратов, некоторых строительных и силикатных материалов и основополагающим в деле повышения эффективности этих предприятий,

важное значение имеют выявление и оценка технического состояния этих систем.

Методы исследования. Эффективность эксплуатации электромеханической системы для обеспечения работы рудоразмольной мельницы обусловлена своевременным выявлением рабочих состояний необходимых узлов. Анализ современного состояния области исследования электромеханических систем, предназначенных для обеспечения работы рудоразмольной мельницы, показывает, что разработано немало теоретических и экспериментальных методов выявления состояния отдельных узлов.

В [1] рассмотрены вопросы совершенствования и оптимизации технического обслуживания оборудования размольного отделения мельницы путём разработки и внедрения методов и средств функциональной вибродиагностики, разработаны диагностические модели дисбаланса ротора, дефекта вальцового станка - "ослабление предохранительной пружины", износа зубьев межвальцовой передачи вальцового станка, а также методика определения технического состояния оборудования методом узкополосного спектрального анализа виброакустического сигнала [1].

В [2] предложен метод исследования рабочих характеристик мельницы на основе закономерностей формирования звукометрического сигнала в зависимости от перегрузки шаровых барабанных мельниц рудой. Показано, что в этом случае резко падает сила звука в зоне перехода шаров с параболических траекторий на круговые. Причем в зависимости от величины шаровой загрузки мельницы одной и той же силе звука может соответствовать как нормальный, так и аварийный режимы работы мельницы.

В [3,4] предложен способ автоматизированной диагностики барабанной мельницы, основанный на контроле динамической составляющей активной мощности приводного двигателя и вибрационных колебаний механической системы. Согласно методу, для оценки состояния системы исследована виброактивность сил трения зубчатых передач.

Однако, несмотря на достигнутые результаты в области исследования состояния электромеханических систем, известные работы посвящены в основном частным вопросам и не обеспечивают высокую эффективность эксплуатации электромеханической системы процесса измельчения руды, и, кроме того, они не учитывают взаимосвязь между технологическими, механическими и энергетическими факторами. Исходя из вышеизложенного, предлагается новый подход к исследованию рабочего состояния электромеханической системы с учетом взаимосвязи между технологическими, механическими и энергетическими параметрами.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является исследование и обнаружение изменения состояния механических передач и приводного двигателя электромеханической системы для обеспечения работы рудоразмольной мельницы.

Для определения рабочих характеристик электромеханической системы и, как следствие, обеспечения работы рудоразмольной мельницы в первую очередь необходимо обнаружить изменения состояния механических передач системы. Учитывая, что последнее зависит от многих факторов, предлагается за основу принять разработанную нами математическую модель, позволяющую путем определения изменения углов поворота, скорости и ускорения венцевой шестерни, смонтированной на корпус барабана, и подшипниковой шестерни, соединенной с валом двигателя, обнаружить возможные изменения состояния механических передач и приводного двигателя [5].

Алгоритм исследования. Для обнаружения состояния рабочих характеристик упругих звеньев, приводящих к нарушению нормальной работы технологического процесса измельчения руды, разработан алгоритм [6], имеющий следующую последовательность:

1. Задаются габаритные размеры барабанной мельницы, угловая скорость вращения барабана, а также количественные и качественные характеристики внутримельничной нагрузки (степень заполнения мельницы, плотность измельчаемого материала, объемная масса измельчающих стальных шаров).
2. Определяются моменты инерции и сопротивления, создаваемые мельницей. Моменты инерции J_M и сопротивления M_M соответственно определяются в виде

$$J_M = m_p \frac{2}{3} \frac{R}{K\pi} \sin^3\left(\frac{\lambda}{2}\right), \quad M_M = G\ell,$$

где G - силы тяжести внутримельничной нагрузки, $G = 1000 gm_p$; K - коэффициент заполнения барабана мельницы; R - внутренний радиус барабана; λ - центральный угол заполнения; m_p - масса внутримельничной нагрузки, $m_p = (\delta + \gamma)K\pi R^2 L$; ℓ - расстояние центра тяжести дробящей среды от

центра барабана, $\ell = \frac{2}{3} \frac{R \sin^3 \frac{\lambda}{2}}{K\pi} \sin\left(\frac{\lambda}{2} - \pi\right)$; δ - плотность измельчаемой руды;

γ - плотность измельчающих шаров; L - длина барабана.

3. Задаются паспортные данные приводного двигателя и жесткость связи между барабаном мельницы и электродвигателем.

4. Определяются углы поворота, скорости и ускорения венцевой шестерни, смонтированной на корпус барабана, и подшипниковой шестерни:

$$\begin{cases} \varphi_1(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t, & \dot{\varphi}_1(t) = a_1 \omega \sin \omega t - b_1 \omega \cos \omega t, \\ \varphi_2(t) = A_0 + A_1 \cos \omega t + B_1 \sin \omega t; & \dot{\varphi}_2(t) = A_1 \omega \sin \omega t - B_1 \omega \cos \omega t; \\ \ddot{\varphi}_1(t) = -a_1 \omega^2 \cos \omega t - b_1 \omega^2 \sin \omega t, \\ \ddot{\varphi}_2(t) = -A_1 \omega^2 \cos \omega t - B_1 \omega^2 \sin \omega t, \end{cases}$$

где $\omega = 2\pi/T$.

Коэффициенты a_0, a_1, b_1 для синхронного электропривода определяются из уравнения

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} 0 & -0,38 & 0 \\ 0 & 0 & -4,38 \\ 0 & 4,38 & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 + \frac{m_2}{J_1} \\ \frac{c}{J_1} \\ 1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{vmatrix} - \frac{m_1}{J_1} \begin{vmatrix} 1,39 & -0,69 & 1,2 \\ -0,69 & -1,46 & -1,65 \\ -0,69 & 2,16 & 0,44 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ b_1 \end{vmatrix} = \\ & - \frac{c}{J_1} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -\frac{m_0}{J_1} \\ -\frac{m_0}{J_1} \\ -\frac{m_0}{J_1} \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

а коэффициенты A_0, A_1, B для асинхронного электропривода:

$$\begin{aligned} & - \frac{c}{J_2} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} a_0 \\ a_1 \\ b_1 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & -4,38 & 0 \\ 0 & 0 & -4,38 \\ 0 & 4,38 & 0 \end{vmatrix} + \frac{c}{J_2} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{vmatrix} + \\ & + \frac{\beta}{J_2} \begin{vmatrix} 1,39 & -0,69 & 1,2 \\ -0,69 & -1,46 & -1,65 \\ -0,69 & 2,16 & 0,44 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{M_0}{J_2} \\ \frac{M_0}{J_2} \\ \frac{M_0}{J_2} \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

В (1) и (2) использованы следующие обозначения: J_1, J_2 – моменты инерции барабана рудоразмельной мельницы и ротора двигателя; m_0, m_1, m_2 – коэффициенты; β – модуль жесткости механической характеристики двигателя; M_0 – начальный момент двигателя.

Для осуществления вышеприведенного алгоритма разработанная программа рассчитана на пользователей, не имеющих специальной подготовки программиста. Обслуживающие модули программы выполняют следующие функции: выбор типоразмеров используемых аппаратов, ввод в диалоговом

режиме исходных данных, вывод результатов анализа в виде таблиц и графических изображений.

На рис. 1 и 2 приведены графики изменения углов поворота, скорости и ускорения венцевой шестерни, смонтированной на корпус барабана, при разных значениях коэффициента заполнения мельницы, а на рис. 3 и 4 – то же, для подшипниковой шестерни, соединенной с валом двигателя, при разных значениях коэффициента заполнения мельницы.

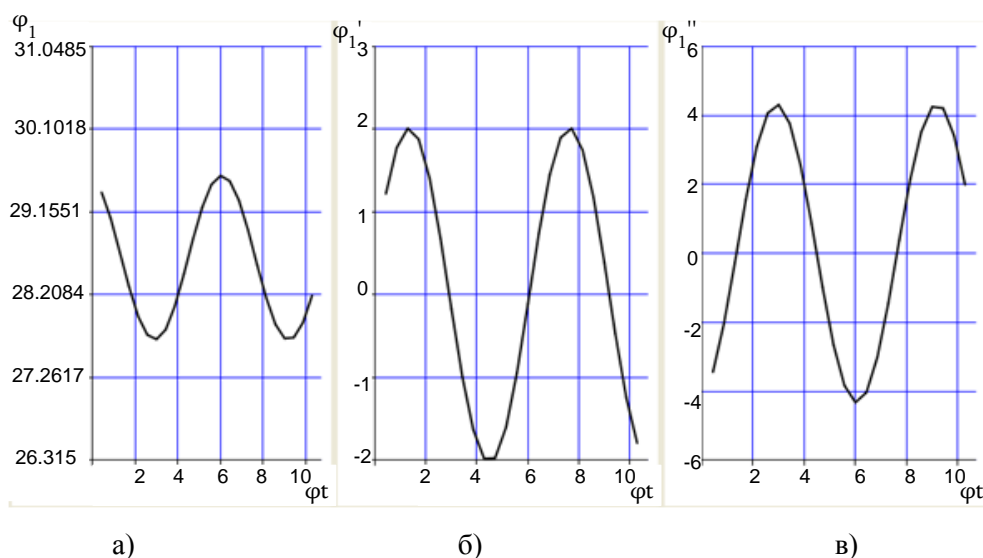


Рис. 1. Изменения углов поворота (а), скорости (б) и ускорения венцевой шестерни (в), смонтированной на корпус барабана рудоразмольной мельницы, при $K=0,5$

Приведенные зависимости получены для шаровой мельницы МШР 2200x13000 и приводного асинхронного двигателя ФАМЦО 1512-8 при $C = 2009250 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{рад}$, $\delta = 3,2 \text{ м}/\text{м}^3$, $\gamma = 2,7 \text{ м}/\text{м}^3$. Графические зависимости получены с учетом того, что значения момента сопротивления мельницы постоянны, что в основном возможно при отсутствии внутримельничной нагрузки. Необходимость такого рассмотрения обусловлена тем, что пуск электромеханической системы в основном проводится без внутримельничной нагрузки.

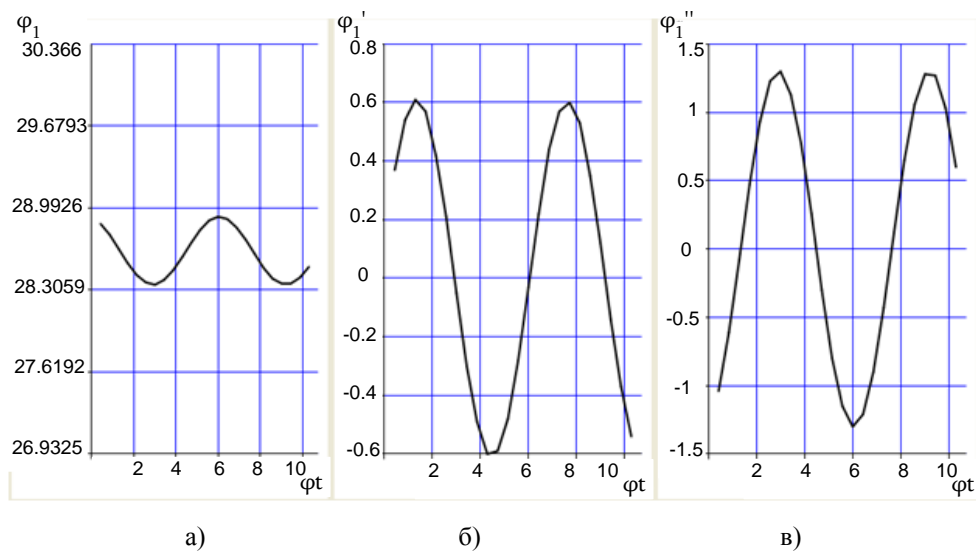


Рис. 2. Изменения углов поворота (а), скорости (б) и ускорения венцевой шестерни (в), смонтированной на корпус барабана рудоразмольной мельницы, при $K=0,15$

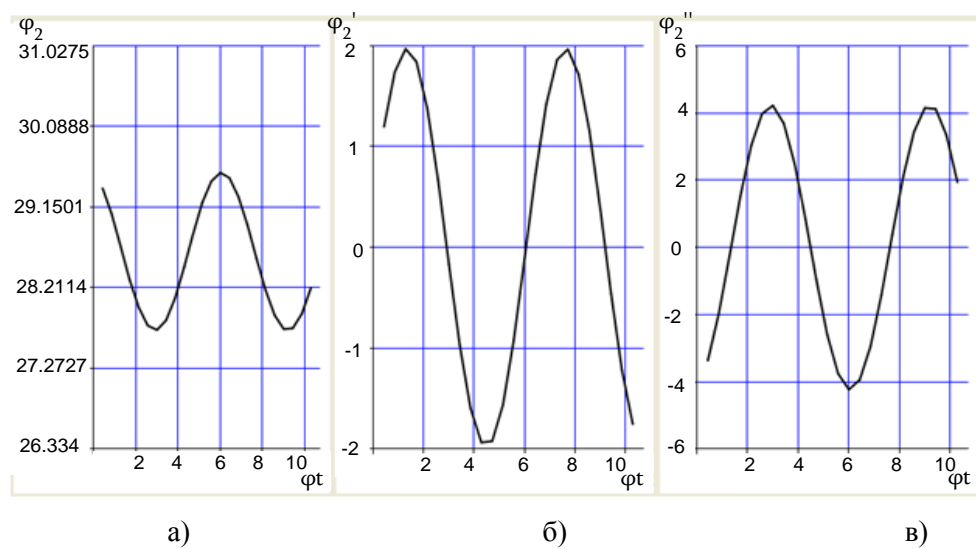


Рис. 3. Изменения углов поворота (а), скорости (б) и ускорения подшипниковой шестерни (в), соединенной с валом двигателя, при $K=0,5$

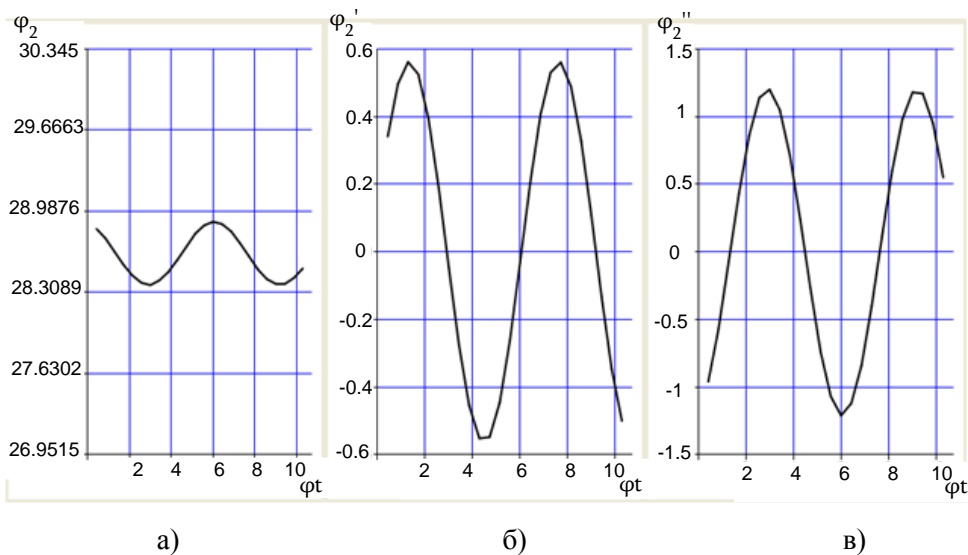


Рис. 4. Изменения углов поворота (а), скорости (б) и ускорения подшипниковой шестерни (в), соединенной с валом двигателя, при $K=0,15$

Из приведенных на рис. 1-4 зависимостей видно, что при уменьшении коэффициента заполнения мельницы значительно уменьшаются амплитудные значения углов поворота, скорости и ускорения венцевой шестерни, смонтированной на корпус барабана рудоразмольной мельницы. При $K=0,15$ амплитудное значение φ'' уменьшается почти в три раза по сравнению с амплитудным значением при $K=0,5$. Кроме того, при уменьшении коэффициента заполнения мельницы наблюдается уменьшение амплитудных значений углов поворота, скорости и ускорения подшипниковой шестерни, соединенной с валом двигателя.

Исследуется рабочее состояние системы электромеханической системы при изменении во времени момента сопротивления M_M . На рис. 5, 6 приведены изменения углов поворота, скорости и ускорения венцевой шестерни, смонтированной на корпус барабана мельницы, а на рис. 7, 8 - то же, для подшипниковой шестерни, соединенной с валом двигателя, при изменяющихся моментах сопротивления и разных значениях коэффициента заполнения мельницы.

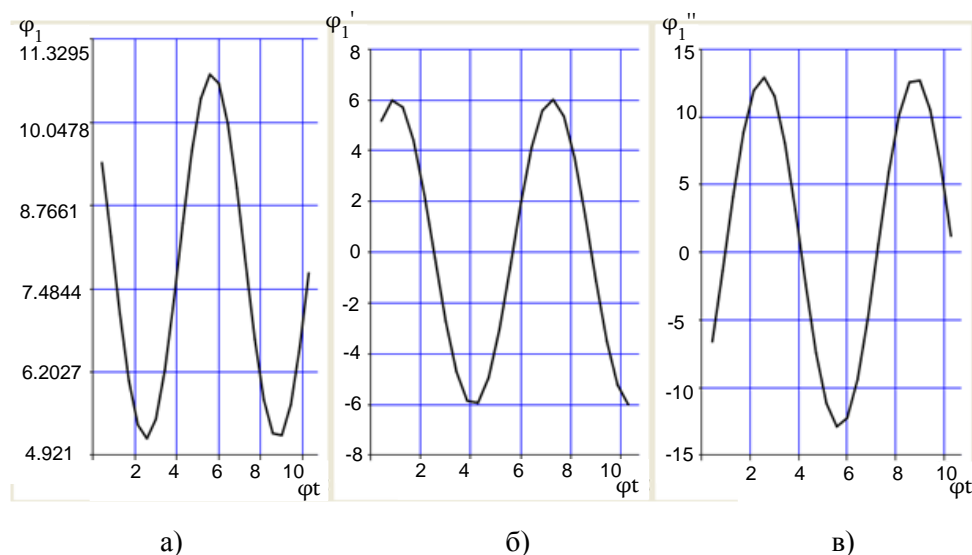


Рис. 5. Изменения углов поворота (а), скорости (б) и ускорения венцевой шестерни (в), смонтированной на корпус барабана рудоразмольной мельницы, при изменяющемся моменте сопротивления мельницы, когда $K=0,5$

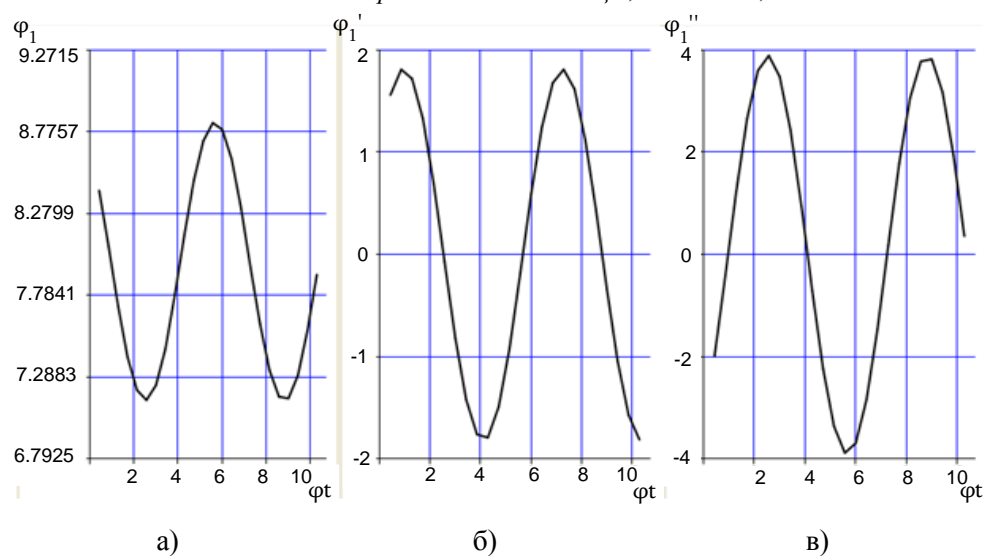


Рис. 6. Изменения углов поворота (а), скорости (б) и ускорения венцевой шестерни (в), смонтированной на корпус барабана рудоразмольной мельницы, при изменяющемся моменте сопротивления мельницы, когда $K=0,15$

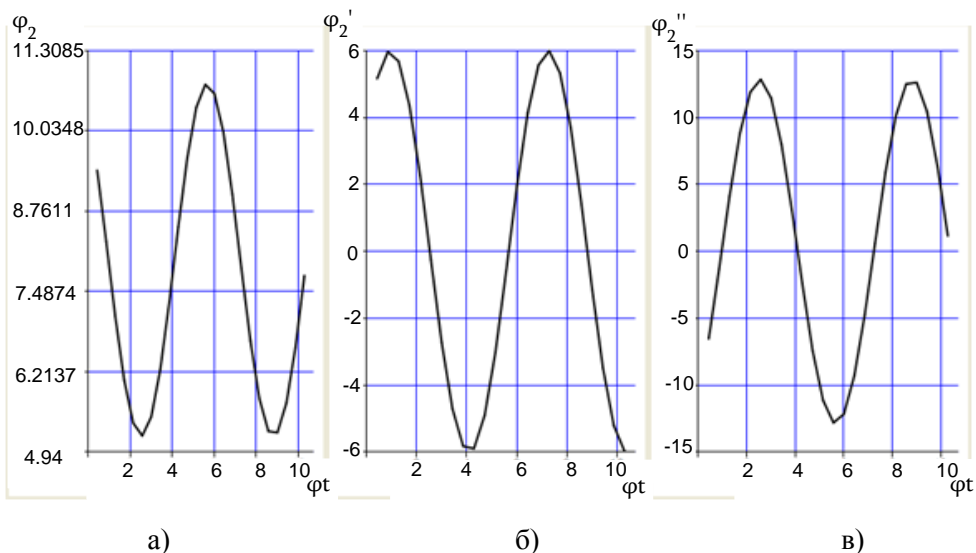


Рис. 7. Изменения углов поворота (а), скорости (б) и ускорения подшипниковой шестерни (в), соединенной с валом двигателя, при изменяющемся моменте сопротивления мельницы, когда $K=0,5$

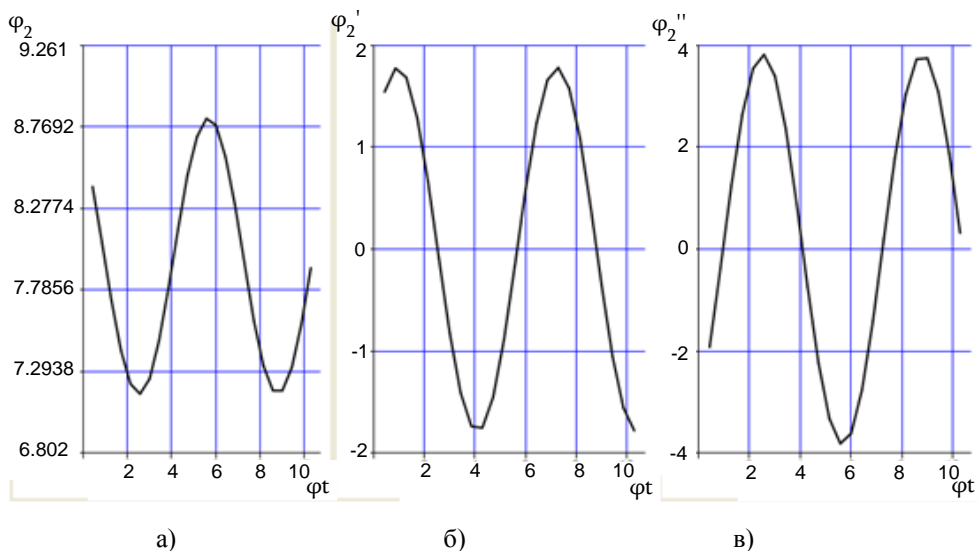


Рис. 8. Изменения углов поворота (а), скорости (б) и ускорения подшипниковой шестерни (в), соединенной с валом двигателя, при изменяющемся моменте сопротивления мельницы, когда $K=0,15$

Из полученных характеристик следует, что при изменяющемся моменте сопротивления мельницы амплитудные значения углов поворота, скорости и ускорения венцевой шестерни барабана и подшипниковой шестерни двигателя

существенно уменьшаются с уменьшением коэффициента заполнения. Причем наиболее существенно уменьшение амплитудных значений скорости и ускорения.

Сравнительный анализ характеристик для постоянного и изменяющегося моментов сопротивления показал, что при изменяющемся моменте сопротивления амплитудные значения углов поворота венцевой шестерни барабана и подшипниковой шестерни двигателя существенно изменяются, в то время как изменение значения их скорости и ускорения несущественно.

Предлагаемые алгоритм и компьютерная программа позволяют путем выбора любого типоразмера барабанной мельницы и соответствующего приводного двигателя оценить рабочее состояние электромеханической системы мельница-двигатель при изменении жесткости связи между барабаном и электродвигателем, а также количественных и качественных характеристик внутримельничной нагрузки.

Выводы

1. Предложен алгоритм исследования электромеханической системы, позволяющий путем определения изменения углов поворота, скорости и ускорения венцевой шестерни, смонтированной на корпус барабана, и подшипниковой шестерни, соединенной с валом двигателя, обнаружить возможные изменения состояния механических передач и приводного двигателя.

2. Предложенный алгоритм позволяет путем выбора любого типоразмера барабанной мельницы и соответствующего приводного двигателя оценить рабочее состояние электромеханической системы для обеспечения работы рудоразмольной мельницы.

Литература

1. **Яблоков А.Е.** Вибродиагностика основного технологического оборудования размольного отделения мельницы: Дис. ... канд. техн. наук. - М., 2001. - 183 с.
2. **Хайсам КА, Шамаллах.** Метод диагностики перегрузки шаровых мельниц рудой на основе закономерностей формирования звукометрического сигнала. – Днепропетровск: Изд-во Национального горного университета.
<http://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/74/17.pdf>
3. А.с. СССР N 948454. Способ интегральной диагностики состояния привода барабанной мельницы / **А.Н. Марюта, А.К. Мороз, И.В. Новицкий.** - 1980.
4. А.с. СССР. N 1130403. Способ автоматической диагностики барабанной мельницы / **А.Н. Марюта и Л.И. Мещеряков.** - 1984.
5. **Багдасарян М.К., Алавердян С.С.** Математическая модель для исследования электромеханической системы мельница-двигатель // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер.ТН.– 2013. – Т.LXVI, N2. – С.148-155.

6. **Багдасарян М.К., Алавердян С.С.** Разработка компьютерной программы для исследования электромеханической системы мельница - двигатель // Materiály IX mezinárodní vědecko - praktická konference «Aplikované vědecké novinky – 2013. - Praha, 2013. - S. 62-65.

*Поступила в редакцию 14.10.2014.
Принята к опубликованию 21.11.2014.*

ՀԱՆՔԱՄԱՆՐԻՉ ԱՂԱՅԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔՆ ԱՊԱՀՈՎՈՂ ԷԼԵԿՏՐՈՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՀԵՏԱԶՈՏՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄ

Մ.Ք. Բաղդասարյան, Ս.Ս. Ալավերդյան, Ա.Մ. Ավետիսյան

Առաջարկվում է հանքամանրիչ աղացի աշխատանքն ապահովող էլեկտրամեխանիկական համակարգի մեխանիկական փոխանցումների և բանեցման շարժիչի հետազոտման և վիճակի փոփոխության բացահայտման մեթոդ: Մեթոդի հիմքում ընկած է այն փաստը, որ այդ փոփոխություններն առաջացնում են աղացի թմբուկի իրանի և շարժիչի լիսեռին ամրացված ենթապսակային ժանանվի շրջման անկյան, արագության, արագացման փոփոխություններ ժամանակի ընթացքում: Մշակվել է ալգորիթմ, որը թույլ է տալիս թմբուկային աղացի տարբեր տեսակաչափի և համապատասխան բանեցման շարժիչների ընտրման ճանապարհով գնահատել աղաց-շարժիչ համակարգի վիճակը թմբուկի և էլեկտրաշարժիչի մեջև կապի կոշտության, ինչպես նաև ներաղացային բեռի որակաքանակական բնութագրերի փոփոխման պայմաններում:

Առանցքային բառեր. էլեկտրամեխանիկական համակարգ, դիմադրող մոմենտ, թմբուկային աղաց, կապի կոշտություն, լցման գործակից:

AN ALGORITHM FOR INVESTIGATING THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM FOR ENSURING THE OPERATION OF AN ORE-GRINDING MILL

M.K. Baghdasaryan, S.S. Alaverdyan, A.M. Avetisyan

A method for investigating and revealing the changes in the state of mechanical transmissions and the drive engine of the electromechanical system is proposed for the purpose of ensuring the operation of the ore-grinding mill. The method is based on the fact that these changes lead to the change of the rotation angle in time, the speed and acceleration of the crown gear mounted on the drum body, as well as the bearing gear combined with the shaft engine. An algorithm is developed allowing to estimate the operation state of the system mill-motor at changing the rigid connection between the drum the electric motor by selecting any standard size of the rattler and the adequate drive engine, as well as the quantitative and qualitative characteristics of the intramill loading.

Keywords: electromechanical system, moment of resistance, rattler, connection rigidity, space factor of a winding.