

УДК 621.316

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНУТРИМЕЛЬНИЧНОЙ НАГРУЗКИ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**М.К. Багдасарян, Т.Н. Мноян**

*Национальный политехнический университет Армении*

Обоснована необходимость исследования и оценки влияния внутримельничной нагрузки рудоразмольной мельницы на рабочие характеристики приводного двигателя. Показано, что при пульсирующей нагрузке имеют место периодические колебания внутреннего угла  $\theta$  синхронного двигателя, достигающие иногда нескольких десятков градусов. В свою очередь, колебания угла  $\theta$  вызывают пульсацию тока статора, электромагнитного момента и потребляемой мощности синхронного двигателя, что иногда приводит к нарушению надежности работы системы. Обоснована актуальность задачи всесторонней оценки рабочих характеристик приводного двигателя. Установлены основные энергетические параметры синхронного двигателя, подлежащие анализу и оценке. Разработан алгоритм оценки зависимости колебания угла  $\theta$  от нагрузочного сопротивления и тока статора приводного синхронного двигателя для четырех гармоник при разных значениях инерционной постоянной ротора. Показано, что повышение напряжения сети выше номинального значения приводит к значительным колебаниям тока статора за счет первой гармоники. Получены частотные характеристики для анализа состояния системы с учетом асинхронной и синхронной составляющих электромагнитного момента синхронного двигателя, а также передаточные функции в среде Matlab с применением критерия Найквиста для оценки устойчивости замкнутой системы по частотной характеристике разомкнутой системы. Предложен способ улучшения рабочих режимов посредством использования регулятора. Полученные результаты позволяют оценить рабочее состояние приводного двигателя рудоразмольной мельницы и могут быть использованы для улучшения рабочих режимов системы двигатель-мельница и предотвращения аномального режима приводного синхронного двигателя. Разработанный алгоритм также позволяет оценить рабочее состояние приводного двигателя при механизме с изменяющейся нагрузкой.

**Ключевые слова:** синхронный двигатель, внутримельничная нагрузка, частотные характеристики, гармоника, рабочие характеристики.

**Введение.** В современных горнообогатительных предприятиях в процессе измельчения руды в качестве электропривода используются двигатели большой мощности (от 6000 до 200000 кВт). Нагрузочный момент рудоразмольной

мельницы в основном зависит от твердости руды, коэффициента заполнения барабана и состояния футеровки барабана мельницы.

При пульсирующей внутримельничной нагрузке имеют место периодические колебания внутреннего угла  $\theta$  синхронного двигателя, достигающие иногда нескольких десятков градусов. Колебания угла  $\theta$  вызывают пульсацию тока статора, электромагнитного момента и потребляемой мощности синхронного двигателя, что, к свою очередь, приводит к нарушению надежности работы системы. Учитывая тот факт, что изменение внутримельничной нагрузки носит случайный характер, возникает необходимость выявления и оценки ее воздействия на параметры, характеризующие рабочее состояние приводного синхронного двигателя. Однако, несмотря на достигнутые результаты в области исследования характеристик приводного синхронного двигателя [1-3], некоторые вопросы остались невыясненными до сих пор. Исходя из вышесказанного, представляет актуальность всесторонняя оценка рабочих характеристик приводного двигателя.

**Постановка задачи и цель исследования.** Целью настоящей работы является детальное исследование и оценка воздействия изменения внутримельничной нагрузки на рабочие характеристики приводного двигателя. Для решения поставленной цели требуется решение следующих задач:

- разработка алгоритма для оценки влияния внутримельничной нагрузки на внутренний угол синхронного двигателя и тока статора;
- получение амплитудно-частотных характеристик, описывающих зависимость амплитуды угла  $\theta$  приводного двигателя от частоты сигнала момента нагрузки;
- получение фазочастотных характеристик, описывающих зависимость разности фаз между углом  $\theta$  и сигналом момента нагрузки от частоты сигнала.

**Оценка рабочих характеристик приводного двигателя при изменении нагрузочного момента.** Ниже приводится алгоритм для анализа и оценки колебаний угла  $\theta$  и тока статора при изменении момента нагрузки, создаваемой рудоразмольной мельницей.

Уравнение движения ротора имеет вид [4]

$$T_j \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_E - M_T. \quad (1)$$

Здесь  $M_E$  - электромагнитный момент двигателя (в долях номинального тока);  $M_T$  - нагрузочный момент синхронного двигателя;  $\theta$  - внутренний угол двигателя между основной электродвижущей силой и напряжением сети;  $T_j$  - инерционная постоянная ротора, определяемая по формуле [5]

$$T_j = H_j \omega_s = \frac{GD^2 n^2}{365000 P_H}, \quad (2)$$

где  $GD^2$  - маховой момент агрегата,  $кгс.м^2$ ;  $P_H$  - номинальная мощность двигателя,  $кВт$ ;  $n$  - номинальная скорость вращения,  $об/мин$ .

Учитывая, что нагрузочный момент приводного синхронного двигателя, обеспечивающий работу электромеханической системы мельница-двигатель, имеет случайный характер, представим его как сумму постоянной составляющей  $M_{T0}$  и ряда гармоник порядка  $k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) [4]:

$$M_T = M_{T0} + \sum_k M_{mk} \sin(\omega_k t + \alpha_k), \quad (3)$$

где  $M_{mk}, \omega_k$  - соответственно амплитуда и угловая частота  $k$ -й гармоники внешнего момента.

Под влиянием изменяющегося нагрузочного момента ротор машины будет колебаться относительно системы координат, вращающейся с синхронной частотой. Следовательно, такие же колебания будут испытывать угол  $\theta$  и электромагнитный момент двигателя. В частности, периодически изменяющийся угол  $\Delta\theta$  представим в виде

$$\Delta\theta = \sum_k \Delta\theta_k = \sum_k \Delta\theta_{mk} \cos(\omega_k t + \beta_k). \quad (4)$$

Изменение электромагнитного момента двигателя  $\Delta M_E$  будет

$$\Delta M_E = \Delta\psi_q \Delta i_d + \Delta\psi_d \Delta i_q. \quad (5)$$

Учитывая, что потокосцепления  $\Delta\psi_q, \Delta\psi_d$  и токи  $\Delta i_d, \Delta i_q$  выражаются рядом Фурье, следовательно,  $\Delta M_E$  представим в виде

$$\Delta M_E = \sum_k \Delta M_{Ek}. \quad (6)$$

С учетом (3), (4) и (6) уравнение (1) примет вид

$$T_j \frac{d^2}{dt^2} \sum_k \Delta\theta_k = \sum_k \Delta M_{Ek} - \left( M_{T0} + \sum_k M_{mk} \cos(\omega_k t + \alpha_k) \right). \quad (7)$$

Из векторной диаграммы явнополюсного синхронного двигателя запишем выражение для угла  $\theta$  [5]:

$$\theta = \arctg \left( \frac{x_q I \cos \varphi}{U_c + x_q I \sin \varphi} \right), \quad (8)$$

где  $x_q$  - индуктивное сопротивление обмотки якоря по поперечной оси;  $U_c$  - напряжение сети, приложенное к обмотке статора двигателя;  $\cos\varphi$  - коэффициент мощности;  $I$  - ток статора.

Преобразуя (8), с учетом (4) получим

$$\operatorname{tg}\left(\sum_k \Delta\theta_{mk} \cos(\omega_k t + \beta_k)\right) (U_c + x_q \Delta I \sin \varphi) = x_q \Delta I \cos \varphi. \quad (9)$$

Из (9) можно записать выражение для изменения тока статора:

$$\Delta I = \frac{\operatorname{tg}\left(\sum_k \Delta\theta_{mk} \cos(\omega_k t + \beta_k)\right) U_c}{\left(x_q \cos \varphi - x_q \sin \varphi \operatorname{tg}\left(\sum_k \Delta\theta_{mk} \cos(\omega_k t + \beta_k)\right)\right)}.$$

На рис. 1 приведены изменения угла  $\theta$  и нагрузочного сопротивления для четырех гармоник при разных значениях инерционной постоянной ротора.

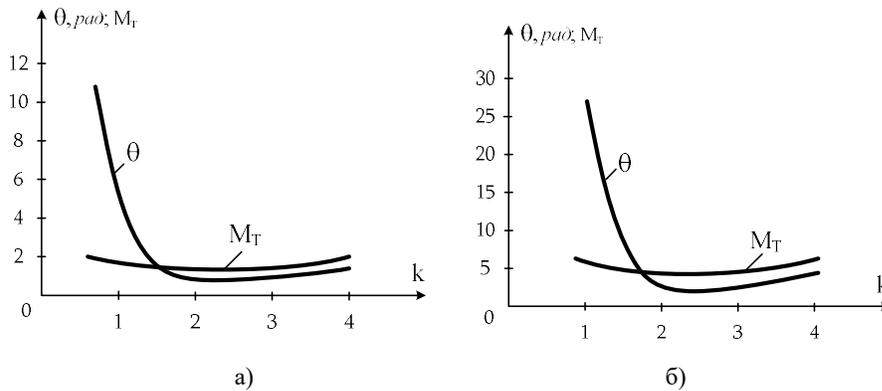


Рис. 1. Изменения угла  $\theta$  и нагрузочного сопротивления при разных гармониках:  
а -  $T_j = 2300 \text{ рад}$ , б -  $T_j = 1680 \text{ рад}$

На рис. 2 приведены изменения тока статора при разных значениях напряжения сети для четырех гармоник.

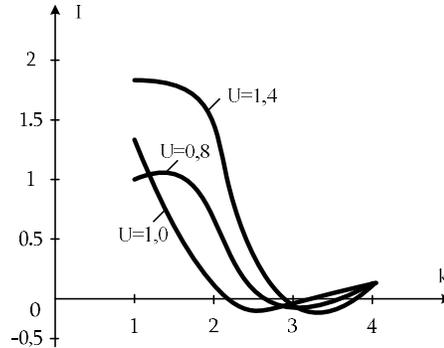


Рис. 2. Изменение тока статора при разных значениях напряжения сети для четырех гармоник

Анализ полученных зависимостей показывает, что высшие гармоники нагрузочного момента приводят к незначительным колебаниям угла  $\theta$  и тока статора (см. рис. 1,2). В рассматриваемом примере уменьшение инерционной постоянной приводит к недопустимым колебаниям угла  $\theta$  за счет первой гармоники. Повышение напряжения сети выше номинального значения приводит к значительным колебаниям тока статора за счет первой гармоники (см. рис. 2).

**Частотные характеристики для анализа состояния системы.** Электромагнитный момент синхронного двигателя можно представить как сумму моментов асинхронной  $M_a$  и синхронной  $M_c$  составляющих:

$$M_E = M_a + M_c .$$

В случае, когда синхронный двигатель работает в асинхронном режиме, то  $M_E = M_a$ , и уравнение (1) примет вид

$$T_j \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{2M_k}{s_k} \frac{d\theta}{dt} = M_T + \frac{dM_T}{dt} . \quad (10)$$

Преобразуем уравнение (10) в следующий вид:

$$T_1 p^2 \theta(p) + T_2 p \theta(p) = M_T(p) + p M_T(p) , \quad (11)$$

где  $T_1 = -T_j$ ,  $T_2 = \frac{2M_k}{s_k}$ .

Из (11) получаем передаточную функцию, характеризующую связь между внутренним углом  $\theta$  и нагрузочным моментом синхронного двигателя:

$$W(p) = \frac{1+p}{T_1 p^2 + T_2 p} . \quad (12)$$

В случае, когда  $M_a = 0$ , то  $M_E = M_c$ , и передаточная функция (12) примет вид

$$W(p) = \frac{1+p}{T_1 p^2 + T_3 p}, \quad (13)$$

где  $T_3 = \frac{3U_c E_f}{\omega x_d}$ .

Получив передаточные функции в среде Matlab, с применением критерия Найквиста [6,7] дана оценка устойчивости замкнутой системы по частотной характеристике разомкнутой системы. Исследованы частотные характеристики в случаях, когда приводной двигатель рудоразмольной мельницы работает в асинхронном или синхронном режимах. На рис. 3 и 4 приведены годографы Найквиста для разомкнутых систем.

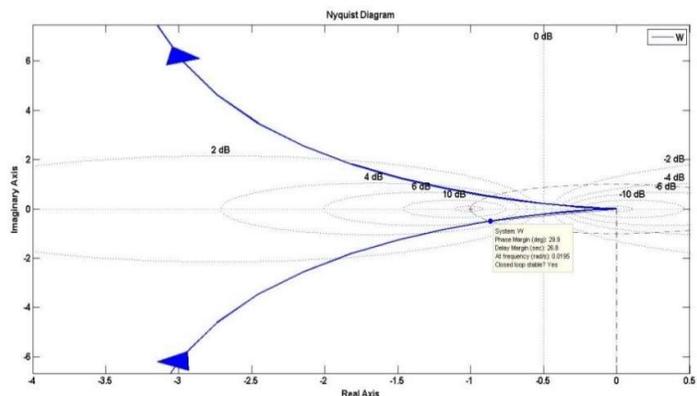


Рис. 3. Годограф Найквиста, когда приводной двигатель работает в асинхронном режиме

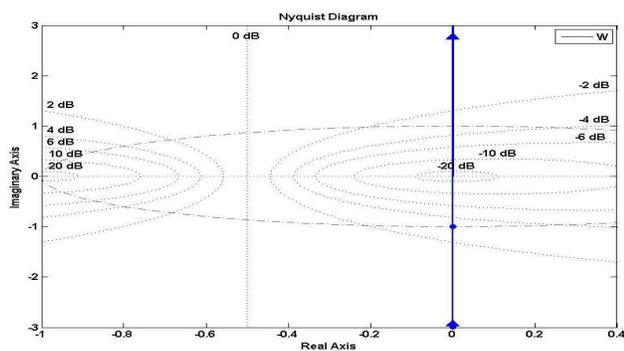


Рис. 4. Годограф Найквиста, когда приводной двигатель работает в синхронном режиме

Исследованы графики переходного процесса, позволяющие определить закон регулирования.

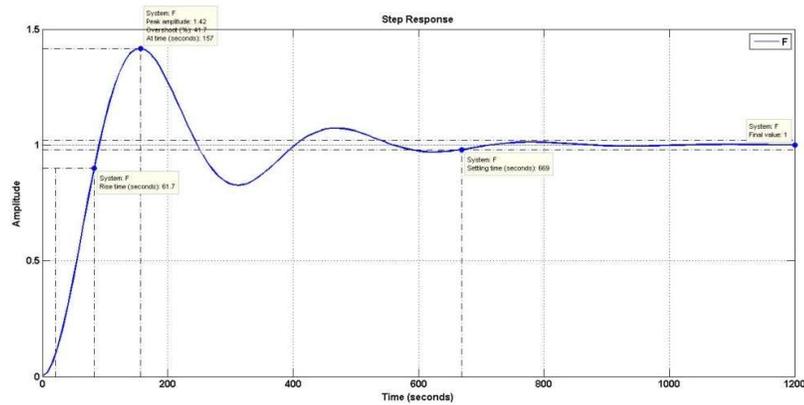


Рис. 5. График переходного процесса системы, когда приводной двигатель работает в асинхронном режиме

Из рис. 5 видно, что время нарастания  $t_{нар} = 61,7$  с, сверхрегулирование -  $\delta = 41,7\%$ , время установления  $t_y = 669$  с. На основе этих параметров при этих параметрах целесообразно проектировать пропорциональный, интегральный, дифференциальный (ПИД) регулятор. Передаточная функция ПИД-регулятора будет

$$C(s) = K_p + Ki \frac{1}{s} + K_d s,$$

где  $K_p = 1,77$ ;  $Ki = 0,00104$ ;  $K_d = 65,9$ .

При использовании ПИД-регулятора передаточная функция разомкнутой системы примет следующий вид:

$$G = \frac{65,88s^3 + 67,65s^2 + 1,767s + 0,00104}{2300s^3 + 24,7s^2}.$$

В результате введения ПИД-регулятора передаточная функция замкнутой системы будет

$$F = \frac{65,88s^3 + 67,65s^2 + 1,767s + 0,00104}{2366s^3 + 92,35s^2 + 1,767s + 0,00104}.$$

При использовании ПИД-регулятора график переходного процесса системы в случае, когда приводной двигатель работает в асинхронном режиме, примет вид, представленный на рис. 6.

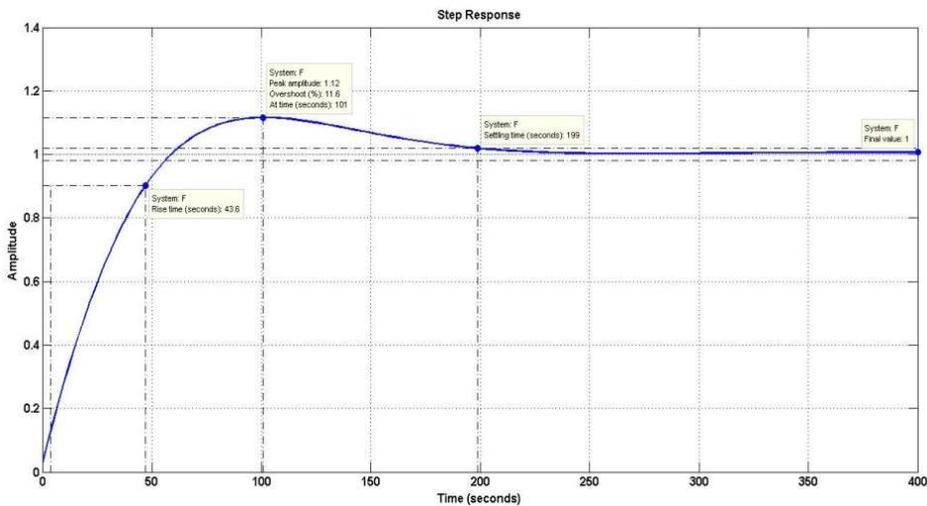


Рис. 6. График переходного процесса системы при использовании ПИД-регулятора, когда приводной двигатель работает в асинхронном режиме

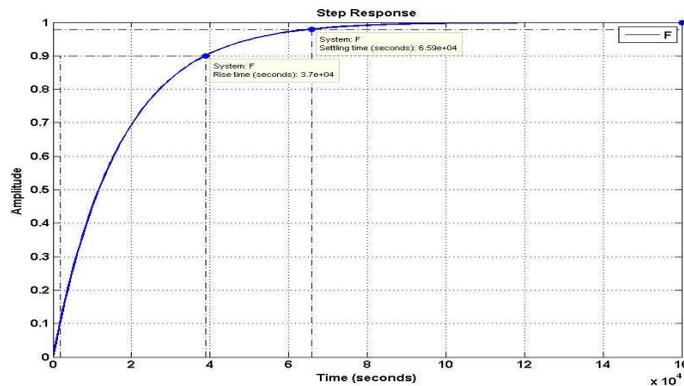


Рис. 7. График переходного процесса системы, когда приводной двигатель работает в синхронном режиме

Из рис. 6 видно, что с использованием ПИД-регулятора время установления системы уменьшается ( $t_c = 199 \text{ c}$ ). Из рис. 7 видно, что время нарастания  $t_{нар} = 37000 \text{ c}$ , сверхрегулирование -  $\delta = 0\%$ , время установления  $t_y = 160000 \text{ c}$ . На основе этих параметров целесообразно проектировать пропорциональный-интегральный (ПИ) регулятор. Передаточная функция ПИ-регулятора будет

$$C(s) = K_p + Ki \frac{1}{s},$$

где  $K_p = 9090$ ;  $Ki = 159000$ .

При использовании ПИ-регулятора передаточная функция разомкнутой системы примет следующий вид:

$$G = \frac{9093 s^2 + 167700 s + 158600}{2300 s^3 + 16844 s^2}.$$

В результате введения ПИ-регулятора передаточная функция замкнутой системы будет

$$F = \frac{9093 s^2 + 167700 s + 158600}{2300 s^3 + 25940 s^2 + 167700 s + 158600}.$$

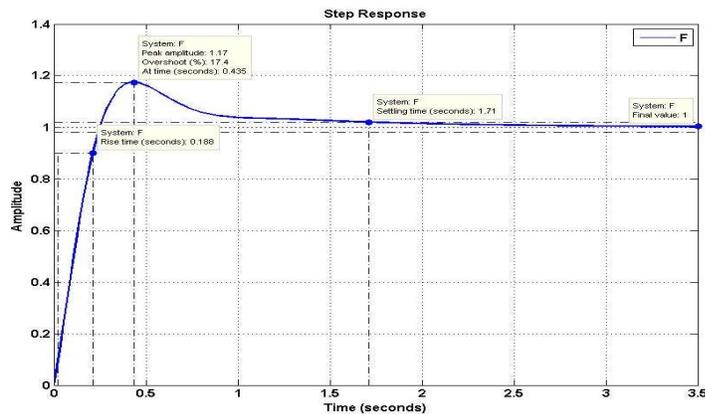


Рис. 8. График переходного процесса системы при использовании ПИ-регулятора, когда приводной двигатель работает в синхронном режиме

График переходного процесса системы при использовании ПИ-регулятора, когда приводной двигатель работает в синхронном режиме, примет вид, представленный на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что с использованием ПИ-регулятора время установления системы уменьшается ( $t_c = 1,71$  с).

**Вывод.** Разработан алгоритм для оценки зависимости колебания угла  $\theta$  от нагрузочного сопротивления и тока статора приводного синхронного двигателя для четырех гармоник при разных значениях инерционной постоянной ротора. Выявлено воздействие внутримельничной нагрузки на рабочее состояние приводного синхронного двигателя. Оценены переходные процессы системы мельница-двигатель в синхронном и асинхронном режимах работы приводного двигателя. Предложен способ улучшения рабочих режимов посредством использования регулятора.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Государственного комитета по науке при Министерстве образования и науки РА, грант 15Т-2В004.

### Литература

1. **Пирматов Н.Б., Ахматов М.Г., Камалов Н.К.** Исследование работы синхронного двигателя с возбуждением по продольной и поперечной осям при ударной нагрузке // Электричество. - 2003. - **№ 2**. - С. 64-65.
2. Simulation of Static Frequency Converter for Synchronous Machine Operation and Investigation of Shaft Voltage / **Arun Kumar Datta, Ansari M.A., Mondal N.R., et al** // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering.- 2014.- Vol.8, No3. - P. 587-592
3. **Зубков Ю.В.** Синхронные электромеханические преобразователи. Часть 1.– 2-е изд. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. - 102 с.
4. **Важнов А.И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. - Л.: Энергия, 1980. - 256 с.
5. **Вершинин П.П., Хашпер Л.Я.** Применение синхронных двигателей в металлургии. - М.: Металлургия, 1974. - 272 с.
6. **Анхимюк В. Л.** Теория автоматического управления. - Минск: Высшаяшая. шк., 2002. - 352 с.
7. **Денисенко В.** ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Часть 1 // Современные технологии автоматизации. - 2007. - №4. - С. 86-97.

*Поступила в редакцию 04.09.2017.*

*Принята к опубликованию 13.12.2017.*

### ԱՂԱՅԻ ԲԵՌԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ԲԱՆԵՑՄԱՆ ՇԱՐԺԻՉԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐԻ ՎՐԱ

**Մ.Ք. Բաղդասարյան, Տ.Ն. Մնոյան**

Հիմնավորվել է բանեցման շարժիչի աշխատանքային բնութագրերի վրա աղացի բեռի ազդեցության գնահատման անհրաժեշտությունը: Ցույց է տրվել, որ բեռի տատանումների դեպքում սինխրոն շարժիչի  $\theta$  ներքին անկյունը ենթարկվում է պարբերական տատանումների, որոնք երբեմն հասնում են մի քանի աստիճանի:  $\theta$  ներքին անկյան տատանումներն առաջացնում են սինխրոն շարժիչի ստատորի հոսանքի, էլեկտրամագնիսական մոմենտի և սպառման հզորության բաբախումներ, ինչը կարող է խախտել համակարգի հուսալի աշխատանքը: Հիմնավորվել է բանեցման շարժիչի աշխատանքային բնութագրերի համակողմանի գնահատման խնդրի արդիականությունը: Մշակվել է դիմադրող մոմենտի, բանեցման սինխրոն շարժիչի ստատորի հոսանքի վրա  $\theta$  անկյան տատանումների կախվածության գնահատման ալգորիթմը չորս հարմոնիկաների և ռոտորի իներցիայի հաստատունի տարբեր արժեքների դեպքում: Ցույց է տրվել, որ ցանցի լարման արժեքի մեծացումը անվանականից առաջացնում է ստատորի հոսանքի

նշանակալի տատանումներ՝ ի հաշիվ առաջին հարմոնիկայի: Համակարգի վիճակի վերլուծման համար ստացվել են հաճախականային բնութագրեր՝ շարժիչի էլեկտրամագնիսական մոմենտի սինխրոն և ասինխրոն բաղադրիչների հաշվառումով: Նայքվիստի չափանիշի կիրառմամբ Matlab միջավայրում ստացվել են փոխանցման ֆունկցիաներ փակ համակարգի կայունության գնահատման համար՝ բաց համակարգի հաճախականային բնութագրերով: Կարգավորիչի կիրառմամբ առաջարկվել է աշխատանքային ռեժիմների բարելավման միջոց: Ստացված արդյունքները թույլ են տալիս գնահատել հանքամանրիչ աղացի բանեցման շարժիչի աշխատանքային ռեժիմները և կարող են օգտագործվել աղաց-շարժիչ համակարգի աշխատանքային ռեժիմների բարելավման, ինչպես նաև բանեցման սինխրոն շարժիչի անկախոն ռեժիմների կանխման համար: Մշակված ալգորիթմը թույլ է տալիս նաև գնահատել փոփոխվող բեռով մեխանիզմի բանեցման շարժիչի աշխատանքային վիճակը:

**Առանցքային բաներ.** սինխրոն շարժիչ, ներաղացային բեռ, հաճախականային բնութագրեր, հարմոնիկա, աշխատանքային բնութագրեր:

## ESTIMATING THE IMPACT OF THE INTRAMILL LOAD ON THE OPERATING CHARACTERISTICS OF THE DRIVE MOTOR

M.Q. Baghdasaryan, T.N. Mnoyan

The necessity of investigating and estimating the impact of the intramill load of the ore grinding mill on the operating characteristics of the drive motor is substantiated. It is shown that at a pulsing load, periodic oscillations of the inner angle  $\theta$  of the synchronous motor take place, sometimes reaching dozens of degrees. In its turn, oscillations of the  $\theta$  angle cause pulsation of the stator current, electromagnetic moment and the consumed power of the synchronous motor which sometimes leads to the disturbance in the reliability of the system operation. The urgency of the problem of comprehensive estimation of the drive motor operating characteristics is substantiated. The main power parameters of the synchronous motor subject to the analysis and estimation are established. An algorithm for estimating the dependence of the oscillation of the angle  $\theta$ , the load resistor and the stator current of the drive synchronous motor for four harmonics at different values of the rotor inertia constant is developed. It is shown that raising the network voltage above the nominal value leads to significant oscillations of the stator current at the expense of the first harmonic. The frequency characteristics for the analysis of the system state, considering the induction and synchronous components of the electromagnetic moment of the synchronous motor are obtained. The transfer functions in the medium Matlab by applying the Nyquist criterion for estimating the stability of the closed system by the frequency characteristic of the open-loop system are obtained. A way of improving the operation modes by using a regulator is proposed. The obtained results allow to estimate the operating state of the ore-grinding mill drive motor, and can be used to improve the operation modes of the system motor-mill and prevent the abnormal mode of the drive synchronous motor.

The developed algorithm also allows to estimate the state of the drive motor at the mechanism with a changing load.

**Keywords:** synchronous motor, intramill loading, frequency characteristics, harmonic, operation characteristics.