

Fig. 7. The machine modelling of transient processes at current of stator, rotor of synchronous machine at a soft start with steel saturation

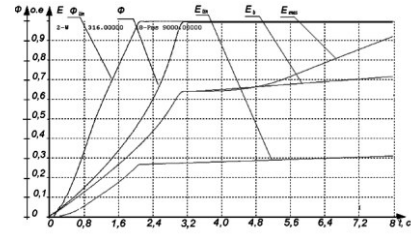


Fig. 8. The machine modelling of energy consumption at a direct start  $E_e$ , start with saturation  $E_{enas}$  and at a linear start  $E_{lin}$

2. The steel saturation of the synchronous machine lead to high-frequency generation, modulated by low-frequency ones. The amplitude of peak current can achieve 40-90% of nominal values of the current.
3. The energy consumption at a linear start is 30 - 40% less than at a direct start.

### References

1. Veynger A.M. Adjustable synchronous electric drive. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 224p.
2. Klyuchev V.I. The electric drive theory: the manual for higher education institutions. – M.: Energoatomizdat, 1985. – 560p.
3. Rudakov V.V. and others. The asynchronous electric drives with vector management / V.V.Rudakov, I.M. Stolyarov, V.A. Dartau. – L. : Energoatomizdat, Leningr. department, 1987. – 136p.
4. Sinchuk I.O. Semiconductor converters of the electric energy in structures of the electric drives. The circuitry and principles of its management./Sinchuk I.O., Chernyshev A.A., Pas'ko O. V., Klyuchka O. E., Kyba I.I., Melnyk O.E./Manual. Under the edition by prof. Sinchuk O.M. – Kremenchug,. Shcherbatykh O. V., 2008. – 88p.
5. Chorniy A.P., Gladar A.I., Osadchuk Yu.G. Kurbanov I.R. Voshun A.N. Starting systems of the unregulated electric drives: The monograph – Kremenchug: Scherbatykh A.V., 2006. – 280p.
6. Shreyner R. T. Mathematical modeling of the alternating current electric drives with frequency semiconductor converter /R.T. Shreyner//– Yekaterinburg: URO RAN. - 2000 . – 654p.

Рекомендовано до друку к-том техн. наук, доцентом Якімцем С.М.

УДК 531.3+621.313.32

Б.В. Виноградов, д-р техн. наук, А.В. Христенко, Д.А. Федин, канд. техн. наук  
(Украина, Днепропетровск, Украинский государственный химико-технологический университет)

### ДИНАМИЧЕСКИЕ И СТАТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ В ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫХ СИНХРОННЫХ ПРИВОДАХ БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

Снижение удельных затрат на измельчение сырья идет по пути создания крупногабаритных барабанных мельниц большой единичной мощности. В связи с ограниченными возможностями механических передач при увеличении мощности свыше 4500–5000 кВт возникла необходимость в создании двухдвигательных приводов, позволяющих передавать необходимую мощность к барабану двумя силовыми потоками. В настоящее время наибольшая мощность двухдвигательных приводов, содержащих две приводные шестерни и зубчатый венец, составляет 15000 кВт [1]. Опыт эксплуатации двухдвигательных приводов с синхронными или асинхронными двигателями, работающими в синхронном режиме, показал, что существует проблема выравнивания нагрузки между линиями передач каждого двигателя. Кроме того, в двухдвигательных приводах возникают дополнительные факторы, вызывающие в механической системе вынужденные колебания [2].

Целью статьи является оценка факторов, влияющих на формирование и распределение нагрузки между линиями передач в двухдвигательных приводах барабанных мельниц.

Неравномерность распределения нагрузки определяется «углом рассогласования роторов». Под углом рассогласования роторов  $\Delta\varphi$  будем понимать угол, на который необходимо повернуть ротор одного двигателя относительно другого, чтобы нагрузка распределилась равномерно.

Различают постоянную и переменную составляющую угла рассогласования роторов в синхронном двухдвигательном приводе. Постоянная величина угла рассогласования  $\Delta\varphi_0$  состоит из электрической и механической составляющей, т.е.

$$\Delta\varphi_0 = \Delta\varphi_{0\varepsilon} + \Delta\varphi_{0,мех}, \quad (1)$$

где  $\Delta\varphi_{0\varepsilon}$ ,  $\Delta\varphi_{0,мех}$  – электрическая и механическая составляющие угла рассогласования соответственно.

Неравномерность распределения нагрузки будем характеризовать коэффициентом  $k_H$ , который равен отношению максимального крутящего момента  $M_{max}$  к номинальному, равному  $0,5M_C$  [2],

$$k_{H,мех} = \frac{M_{max}}{0,5M_C} = 1 + \frac{c_{мех} \cdot \Delta\varphi_{0,мех}}{M_C}; \quad (2)$$

$$k_{H\varepsilon} = 1 + \frac{c_{дв} \cdot \Delta\varphi_{0\varepsilon}}{M_C}, \quad (3)$$

где  $k_{H,мех}$ ,  $k_{H\varepsilon}$  – соответственно коэффициенты неравномерности распределения нагрузки, вызванной механической и электрической составляющими угла рассогласования роторов;  $c_{мех}$  – приведенная жесткость механической системы, Н·м;  $M_C$  – момент сопротивления, приложенный к барабану;  $c_{дв}$  – электромагнитная жесткость двигателя, [3], определяемая как

$$c_{дв} = \frac{M_{ном} \cdot p}{\theta_{\varepsilon л}}, \text{ Н·м}, \quad (4)$$

$M_{ном}$  – номинальный момент двигателя;  $p$  – число пар полюсов двигателя;  $\theta_{\varepsilon л}$  – внутренний угол двигателя в электрических единицах, который можно определить так:

$$\theta_{\varepsilon л} = 0,001n + 7,7 \cdot 10^{-6}n^2, \quad (5)$$

$n$  – частота вращения двигателя, об/мин.

Подставляя в уравнение (3) выражение (4), а также, учитывая, что угол рассогласования роторов в уравнении (3)  $\Delta\varphi_{0\varepsilon} = \Delta\theta_{\varepsilon л}/p$ , получим

$$k_{H\varepsilon} = 1 + 0,5 \frac{\Delta\theta_{\varepsilon л}}{\theta_{\varepsilon л}}, \quad (6)$$

где  $\Delta\theta_{\varepsilon л}$  – несогласованная величина внутреннего угла двигателей, а  $M_{ном} = 0,5M_C$ .

Из выражений (5) и (6) следует, что одна и та же величина угла  $\Delta\theta_{\varepsilon л}$  в приводах, оборудованных более быстроходными двигателями, будет приводить к меньшей неравномерности распределения нагрузки (рис. 1)

Для снижения возможной неравномерности распределения нагрузки между двигателями в процессе монтажа необходимо при соединенных валах двигателя и механической системы согласовать роторы двигателей и выбрать все кинематические зазоры в механической системе. При этом валы двигателей и входные валы редукторов (приводных шестерен) займут определенное положение, в котором их необходимо соединить специальными нониусными муфтами [4].

Учитывая, что при частоте питающей сети  $f = 50$  Гц число пар полюсов двигателя  $p = 3000/n$ , то

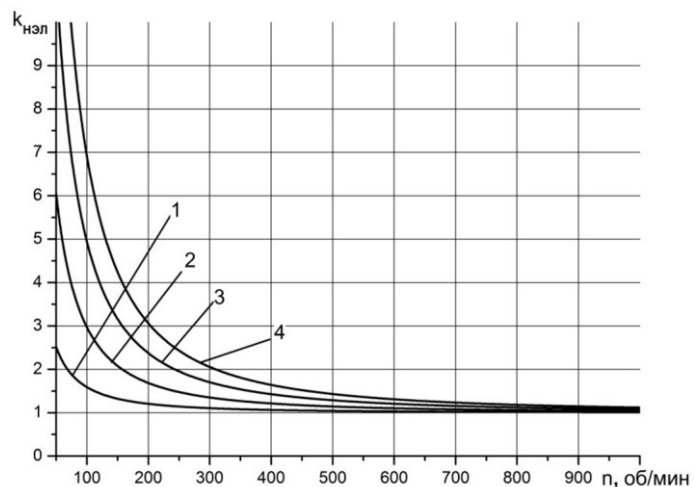


Рис. 1. Кривые зависимости коэффициента неравномерности распределения нагрузки от номинальной частоты вращения двигателей при различных величинах внутреннего угла рассогласования роторов в электрических градусах: 1 –  $\Delta\theta_{\varepsilon л} = 3$ ; 2 –  $\Delta\theta_{\varepsilon л} = 10$ ; 3 –  $\Delta\theta_{\varepsilon л} = 20$ ; 4 –  $\Delta\theta_{\varepsilon л} = 30$ .

углы рассогласования роторов в механических и электрических единицах можно связать между собой такой зависимостью:

$$\Delta\theta_{эл} = \Delta\theta_{мех} \frac{3000}{n}, \quad (7)$$

где  $\Delta\theta_{мех}$  – абсолютная величина неточности монтажа, рад.

Из выражения (7) вытекает, что с увеличением частоты вращения двигателя, при нониусных муфтах одной и той же точности, уменьшается погрешность монтажа и, следовательно, остаточная величина угла рассогласования роторов. Например, при частоте вращения двигателей  $n = 150$  об/мин и погрешности монтажа  $\Delta\theta_{мех}$  остаточная величина несогласованности двигателей  $\Delta\theta_{эл} = 20\Delta\theta_{мех}$ , а при частоте вращения  $n = 1000$  об/мин –  $\Delta\theta_{эл} = 3\Delta\theta_{мех}$ .

На статическую величину крутящих моментов будут накладываться динамические составляющие, вызванные кинематическими погрешностями в механической системе привода. Кинематическая составляющая угла рассогласования определяется в основном накопленной ошибкой шага открытого зубчатого зацепления и радиальным биением зубчатого венца [4]:

$$\Delta_k = \sum_{i=1}^n \Delta_{ki} \sin(p_i t + \beta_i),$$

где  $\Delta_{ki}$ ,  $p_i$ ,  $\beta_i$  – амплитуда, частота и начальная фаза кинематического угла рассогласования соответственно

Для анализа динамических нагрузок, рассмотрим эквивалентную динамическую схему двухдвигательного синхронного привода представим на рис. 2, где  $I_1, I_2, I_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  – приведенные моменты инерции и углы поворота, соответственно, двигателей и барабана мельницы;  $c_{13}, c_{23}$  – приведенная жесткость механических систем, соответственно первого и второго двигателя;  $M_{эм1(2)}$  – электро-магнитный момент первого и второго двигателя;  $M_C$  – приведенный момент сопротивления;  $\Delta\varphi(t)$  – кинематическое возмущение.

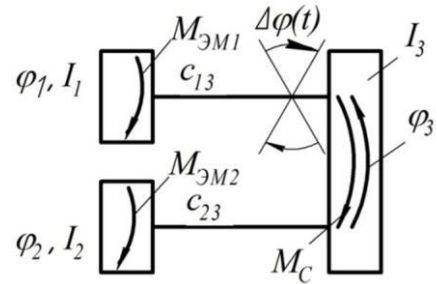


Рис. 2. Приведенная эквивалентная динамическая схема двухдвигательного синхронного привода барабанной мельницы

Электромагнитные процессы в синхронных двигателях будем описывать уравнениями Парка-Горева [4]. Тогда дифференциальные уравнения электромеханической системы двухдвигательного привода, в относительных единицах, представим в виде

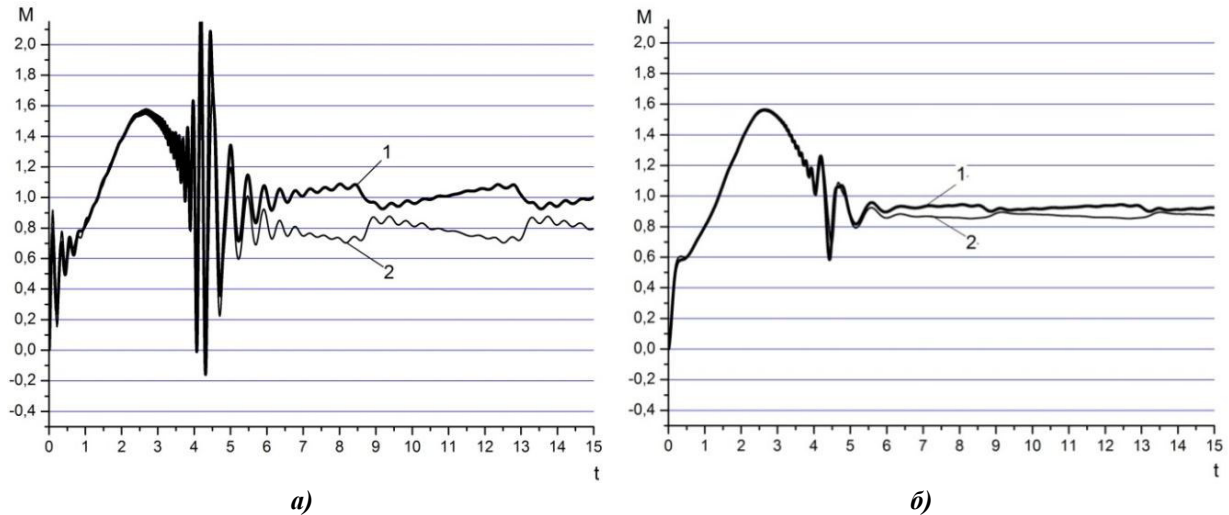
$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{d1(2)}}{dt} = U_m \sin\theta_{1(2)} - \left( \frac{\Psi_{d1(2)}}{X''_{d1(2)}} - \frac{\Psi_{f1(2)}}{X''_{df1(2)}} - \frac{\Psi_{эд1(2)}}{X''_{дэд1(2)}} \right) r_{a1(2)} - \Psi_{q1(2)}\omega_{1(2)}; \\ \frac{d\Psi_{q1(2)}}{dt} = U_m \cos\theta_{1(2)} - \left( \frac{\Psi_{q1(2)}}{X''_{q1(2)}} - \frac{\Psi_{эq1(2)}}{X''_{qэq1(2)}} \right) r_{a1(2)} + \Psi_{d1(2)}\omega_{1(2)}; \\ \frac{d\Psi_{f1(2)}}{dt} = U_{f1(2)} - \left( \frac{\Psi_{f1(2)}}{X''_{f1(2)}} - \frac{\Psi_{d1(2)}}{X''_{df1(2)}} - \frac{\Psi_{эд1(2)}}{X''_{фэд1(2)}} \right) r_{f1(2)}; \\ \frac{d\Psi_{эд1(2)}}{dt} = - \left( \frac{\Psi_{эд1(2)}}{X''_{эд1(2)}} - \frac{\Psi_{d1(2)}}{X''_{дэд1(2)}} - \frac{\Psi_{f1(2)}}{X''_{фэд1(2)}} \right) r_{эд1(2)}; \\ \frac{d\Psi_{эq1(2)}}{dt} = - \left( \frac{\Psi_{эq1(2)}}{X''_{эq1(2)}} - \frac{\Psi_{q1(2)}}{X''_{qэq1(2)}} \right) r_{эq1(2)}; \\ \frac{d\theta_{1(2)}}{dt} = 1 - |\omega_{1(2)}|; \end{cases}$$

$$M_{эм1(2)} = \Psi_{q1(2)}\dot{i}_{d1(2)} - \Psi_{d1(2)}\dot{i}_{q1(2)};$$

$$\begin{cases} \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{H_1} \left[ M_{эм1} - c_{13} \left( \varphi_1 - \varphi_3 - \sum_{i=1}^{10} \Delta_i \sin i \pi t \right) - \mu_{13} (\omega_1 - \omega_3) \right]; \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{H_2} \left[ M_{эм2} - c_{23} (\varphi_2 - \varphi_3) - \mu_{23} (\omega_2 - \omega_3) \right]; \\ \frac{d\omega_3}{dt} = \frac{1}{H_3} \left[ c_{13} \left( \varphi_1 - \varphi_3 - \sum_{i=1}^{10} \Delta_i \sin i \pi t \right) + \mu_{13} (\omega_1 - \omega_3) + c_{23} (\varphi_2 - \varphi_3) + \mu_{23} (\omega_2 - \omega_3) - M_C \right]; \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1; \quad \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2; \quad \frac{d\varphi_3}{dt} = \omega_3, \end{cases}$$

где  $\Psi_{d1(2)}$ ,  $\Psi_{q1(2)}$  – потокосцепления обмоток статора по продольной и поперечной оси;  $\Psi_{f1(2)}$  – потокосцепления обмоток возбуждения;  $\Psi_{эд1(2)}$ ,  $\Psi_{эq1(2)}$  – потокосцепления демпферных обмоток по продольной и поперечной оси;  $U_m$  – амплитуда фазного напряжения;  $U_{f1(2)}$  – напряжение обмотки возбуждения;  $\omega_1(2)$ ,  $\omega_3$  – угловая частота вращения вала первого двигателя, второго двигателя и барабана соответственно;  $H_1(2)$ ,  $H_3$  – моменты инерции двигателей и барабана;  $M_{эм1(2)}$  – электромагнитный момент;  $M_C$  – момент сопротивления;  $\theta_1(2)$  – угол между вектором наведенной в статоре ЭДС от тока возбуждения и вектором напряжения сети;  $r_{a1(2)}$ ,  $r_{f1(2)}$ ,  $r_{эд1(2)}$ ,  $r_{эq1(2)}$  – соответственно активные сопротивления фазы статора, обмотки возбуждения, демпферной обмотки по продольной и поперечной оси соответственно;  $X''_{d1(2)}$ ,  $X''_{f1(2)}$ ,  $X''_{эд1(2)}$ ,  $X''_{df1(2)}$ ,  $X''_{dэd1(2)}$ ,  $X''_{fэд1(2)}$ ,  $X''_{q1(2)}$ ,  $X''_{эq1(2)}$ ,  $X''_{qэq1(2)}$  – сверхпереходные сопротивления (индекс 1 и 2 относятся соответственно к первому и второму двигателю).

На рис. 3 приведены расчетные значения крутящего момента в относительных единицах при прямом пуске и установившемся режиме работы двухдвигательного привода мельницы, содержащего двигателя СДМ32-21-91-40 УХЛ4 мощностью 4 000 кВт и частотой вращения  $n = 150$  об/мин.



**Рис. 3. Крутящий момент  $M$  в относительных единицах при прямом пуске и установившемся режиме работы двухдвигательного привода: 1, 2 – механические системы первого и второго двигателя соответственно; а – приведенная жесткость механических систем каждой линии передач ( $c_{мех} = 12 \cdot 10^6$  Н·м), внутренний угол рассогласования роторов  $\Delta\theta_{эл} = 10$ ; б –  $c_{мех} = 2 \cdot 10^6$  Н·м,  $\Delta\theta_{эл} = 10$  электрических градусов.**

#### Выводы

Для равномерного распределения нагрузки между линиями передач каждого синхронного двигателя необходимо в процессе монтажа согласовывать положение роторов, при которых обеспечивается равенство внутренних углов  $\theta$ . При этом одна и та же величина несогласования внутреннего угла  $\Delta\theta_{эл}$  в приводах, оборудованных более быстроходными двигателями, будет приводить к меньшей неравномерности

распределения нагрузки. Кроме того, применение приводов с быстроходными двигателями упрощает процесс согласования положений роторов, так как отношение несогласованной величины внутреннего угла  $\Delta\theta_{эл}$  к погрешности монтажа  $\Delta\theta_{мех}$ , обратно пропорционально частоте вращения двигателя и прямо пропорционально числу полюсов.

Особенностью динамики двухдвигательных приводов является возможность возникновения вынужденных колебаний, вызванных накопленной ошибкой в зубчатом зацеплении.

Применение специальных муфт пониженной жесткости позволяет более равномерно распределить нагрузку и ограничить её динамическую составляющую.

#### Список литературы

1. Стюарт М., Джонс Свалбонас (Metso Minerals). Крупногабаритные мельницы измельчения компании Metso Minerals / М. Стюарт, Свалбонас Джонс // Горн. пром-сть. – 2007. – №1 (70). – С.58–64.
2. Виноградов, Б.В. Вынужденные колебания двухдвигательных синхронных приводов барабанных мельниц / Б.В. Виноградов, А.В. Христенко // Наук. вісн. НГУ. – 2012. – №6. – С.72–76.
3. Виноградов, Б.В. Механический аналог синхронного двигателя / Б.В. Виноградов, Д. А. Федин // Научный вестник НГУ. – 2012. – №1. – С.78–82.
4. Виноградов, Б.В. Динаміка барабаних млинів: монографія / Б.В. Виноградов. – Д.: УДХТУ, 2004. – 127 с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Самусею В.І.*

УДК 621.337.41

**K. Losina, assistant, S. Yakimets, Ph.D. (tech.), Assoc. Prof.**

*Ukraine, Kremenchuk, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*

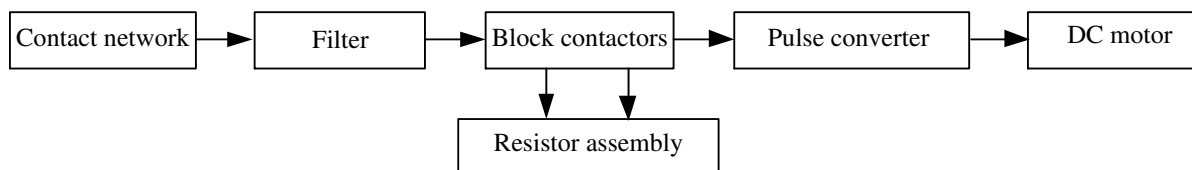
## RESEARCH OF THE POWER EFFECTIVENESS OF THE TRACTION ELECTROTECHNICAL COMPLEX MOTION TRAJECTORY REALIZATION IN A TROLLEYBUS WITH PEAK MOTOR EFFICIENCY

### Introduction

The requirements imposed on traction electrotechnical complex are increasing day by day. This is expressed in raising evaluation of quality, ease of implementation, efficiency, reliability and performance when the necessary criteria for optimality [1] are met.

The control systems of traction electrotechnical complex (TEC) of city electric transport are diverse. They are formed by power electric circuits, which include traction DC motors and devices, machines and converters and auxiliary circles, which include auxiliary electrical machines, heating and lighting devices.

Considerable part of the trolleybuses, operated in the cities of Ukraine, are equipped with rheostat-contact control systems (RCCS) of traction complex [2], the simplified structure is given in Fig. 1.



**Fig. 1. The structure of the electrotechnical complex of trolleybus with RCCS**

Such control systems of traction electrotechnical complexes have certain advantages: simplicity of construction and repair, relatively high controllability. They are characterized by some disadvantages: significant weight and dimension parameters, have high level of electrical energy losses in the resistors.

Development of power semiconductor technology has allowed a new quality mode control system of traction motors: thyristor-pulse, later – transistor-pulse [3] regulatory system, which simplified structure shown in Fig. 2.

Transfer to noncontact pulse control system significantly changes the scheme and the working conditions of traction complex of trolleybus, improving the traction performance and enhancing economic efficiency of electric traction. Stepless control provides automatic control of the engine, allows to obtain any traction characteristics. Soft start reduces energy loss and improves acceleration of trolleybus at start without increasing engine power, simplifies power circuit trolley. These control systems provide work of traction complex of trolleybus type ZYU-683, 14 Tr [3].