

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-5-427-435

УДК 621.313.333

Влияние момента растормаживания на переходные процессы и износ фрикционных накладок в асинхронном двигателе

В. В. Соленков¹⁾, В. В. Брель¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель,
Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Время и путь торможения электропривода с частыми пускотормозными режимами, содержащего асинхронный двигатель с встраиваемым комбинированным тормозным устройством, зависят от того, в какой момент времени происходит растормаживание электромагнита. При этом учитываются другие немаловажные критерии: износостойкость тормозного устройства и плавность торможения электропривода. В общем случае такой асинхронный двигатель содержит асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, электромеханический нормально-замкнутый тормоз, электромагнитную муфту скольжения и схему управления. Представлены механические характеристики торможения асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством при различных моментах растормаживания электромагнита. Приведена математическая модель и представлены переходные процессы в таком двигателе. Формирование моделей для исследования на ЭВМ осуществляли на языке программирования Fortran 2008. Расчет системы дифференциальных уравнений производили методом Рунге – Кутты. Растормаживание электромеханического тормоза при различной скорости привело к разным значениям времени и путей торможения. Показаны графики зависимости пути и времени торможения при различных моментах растормаживания электромагнита. Оптимальным моментом включения электромеханического тормоза, обеспечивающим малые путь и время торможения, является момент при скорости $\omega_{вкл} = 0,6-0,8$ от номинальной. При этом допустимое число торможений для фрикционной накладки (по сравнению с механическим торможением) увеличится в 1,6–2,8 раза. Экспериментальные исследования подтвердили правильность полученных математических моделей и выявленных закономерностей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тормоз, муфта скольжения, путь и время торможения, фрикционные накладки

Для цитирования: Соленков, В. В. Влияние момента растормаживания на переходные процессы и износ фрикционных накладок в асинхронном двигателе / В. В. Соленков, В. В. Брель // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 427–435

Адрес для переписки

Соленков Виталий Владимирович
Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48а, корп. 2,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-18-27
kaf_toe@gstu.by

Address for correspondence

Solencov Vitaly V.
P. O. Sukhoi State Technical University
of Gomel
48a, build. 2, October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-18-27
kaf_toe@gstu.by

Influence of the Time of Disinhibition to Transients and Wear of the Friction Linings in an Asynchronous Motor

V. V. Solencov¹⁾, V. V. Brel¹⁾

¹⁾P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. Time and the stopping distance of the electric drive with frequent starting-and-braking modes that contain embedded asynchronous motor with a recessed combined braking device depend on the moment of an electromagnet disinhibition. At the same time other important criteria are taken into the account, i.e. wear resistance of the brake device and the smoothness of the deceleration of the electric drive. In general such an asynchronous motor contains asynchronous engine with squirrel-cage rotor, electromechanical normally-closed brake, electromagnetic slip clutch and control circuit. The mechanical characteristics of the deceleration of asynchronous motor with recessed combined brake device at different moments of an electromagnet disinhibition are presented. The mathematical model is featured and the transients in such a motor are presented. Formation models for computer research were carried out in the Fortran 2008 programming language. Calculation of the system of differential equations was fulfilled by the Runge – Kutta method. The deceleration of the electromechanical brake at various speeds caused different time values and stopping distances. The plots of stopping distance and the braking time at various moments of an electromagnet disinhibition are demonstrated. The optimum moment of switching on an electromechanical brake, providing small stopping distance and the braking time is the time when the speed $\omega_{\text{вкл}} = 0,6-0,8$ of the nominal. In this case the acceptable number of brake applications for friction linings (compared with mechanical braking) will increase by 1.6–2.8 times. The pilot study confirmed the validity of the obtained mathematical models and discovered patterns.

Keywords: asynchronous motor, brake, slip clutch, path and deceleration time, friction linings

For citation: Solencov V. V., Brel V. V. (2016) Influence of the Time of Disinhibition to Transients and Wear of the Friction Linings in an Asynchronous Motor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (5), 427–435 (in Russian)

Введение

Время и путь торможения электропривода с частыми пускотормозными режимами, содержащего асинхронный двигатель с встраиваемым комбинированным тормозным устройством (АД с ВКТУ), зависят от того, в какой момент времени происходит растормаживание электромагнита [1]. При этом учитываются другие немаловажные критерии: износостойкость тормозного устройства и плавность торможения электропривода. В связи с этим есть необходимость исследовать влияние момента растормаживания электромагнита на электромеханические переходные процессы и выявить оптимальные условия эксплуатации АД с ВКТУ в электроприводах с частыми пускотормозными режимами.

Основная часть

В общем случае АД с ВКТУ содержит асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, электромеханический нормально замкнутый тормоз, электромагнитную муфту скольжения и схему управления [1]. Формирование тормозной механической характеристики происходит следующим

образом. После отключения двигателя от сети форсирующее напряжение подается на электромагнитную муфту скольжения. Двигатель начинает тормозиться электромагнитным полем, создаваемым вихревыми токами в тормозном диске, который жестко связан с валом двигателя. Чем больше скорость вращения вала двигателя, тем больший тормозной момент создает электромагнитная муфта. В процессе торможения скорость вала замедляется, и при достижении заданной скорости включения $\omega_{\text{вкл}}$ схема управления размыкает электромеханический тормоз. С этого момента на вал двигателя действует суммарный тормозной момент от муфты и от электромеханического тормоза. Скорость включения $\omega_{\text{вкл}}$ определяется необходимой тормозной механической характеристикой электропривода и задается изначально в схеме управления. Требуемая тормозная механическая характеристика для электропривода определяется в ходе исследования или экспериментально.

Механические характеристики торможения АД с ВКТУ при различных скоростях включения ($\omega_{\text{вкл}} = 0,25; 0,50; 0,75$ от номинальной) электромеханического тормоза представлены на рис. 1. Различные механические характеристики приводят к разным видам переходных процессов в АД с ВКТУ и к разной степени износа фрикционных накладок электромеханического тормоза.



Рис. 1. Механические характеристики торможения асинхронного двигателя с встраиваемым комбинированным тормозным устройством при различных скоростях включения $\omega_{\text{вкл}}^{\circ}$: 1 – 0,75; 2 – 0,50; 3 – 0,25 от номинальной

Fig. 1. Mechanical braking characteristics of asynchronous motor with an embedded combined braking device at various switching speeds $\omega_{\text{вкл}}^{\circ}$: 1 – 0,75; 2 – 0,50; 3 – 0,25 out of the nominal one

При аналитическом исследовании переходных процессов в тормозных электродвигателях [2] возникают серьезные трудности, обусловленные нелинейностью уравнений при переменной угловой скорости ротора ω_r . В то же время известно, что наиболее эффективным инструментом для решения подобных уравнений является ЭВМ. Она позволяет быстро и с до-

статочной степенью точности решать систему нелинейных уравнений асинхронного двигателя при варьировании параметров в широких пределах. Поэтому для исследования переходных процессов использовали метод математического моделирования на ЭВМ.

Известные уравнения, записанные в ортогональной системе координат α, β , неподвижной относительно несимметричной части АД с ВКТУ [1], выглядят следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} + r_1 i_{s\alpha} + \frac{2}{3} u_3; \\ u_{s\beta} &= \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} + r_1 i_{s\beta}; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + r_2 i'_{r\alpha} + \omega_p \Psi_{r\beta}; \\ 0 &= \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} + r_2 i'_{r\beta} - \omega_p \Psi_{r\alpha}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$M = \frac{3}{2} \frac{x_m}{\omega_o} p (i'_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{s\alpha} i'_{r\beta}); \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} W_s &= \frac{3}{2} r_1 \int_0^t (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2) dt; \\ W_r &= r_2 \int_0^t (i_{r\alpha}'^2 + i_{r\beta}'^2) dt, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{s\alpha} &= \omega_o^{-1} (x_s i_{s\alpha} + x_m i'_{r\alpha}); \\ \Psi_{s\beta} &= \omega_o^{-1} (x_s i_{s\beta} + x_m i'_{r\beta}); \\ \Psi_{r\alpha} &= \omega_o^{-1} (x_r i'_{r\alpha} + x_m i_{s\alpha}); \\ \Psi_{r\beta} &= \omega_o^{-1} (x_r i'_{r\beta} + x_m i_{s\beta}); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$x_s = x_1 + x_m$ – полное индуктивное сопротивление обмотки статора; $x_r = x_2' + x_m$ – то же приведенной обмотки ротора; x_1, x_2' – индуктивные сопротивления рассеяния статорной и приведенной роторной обмоток; x_m – то же взаимоиндукции.

Учитывая рекомендации [2] относительно наиболее удобной формы записи уравнений асинхронного двигателя и соответствующей ей структурной схемы модели, преобразуем (1), (2). Для этого решим уравнения системы (4) относительно $i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i'_{r\alpha}, i'_{r\beta}$. Далее, подставив полученные выражения в (1) и (2) и произведя преобразования, получим иную форму записи этих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{sa}}{dt} &= u_{sa} - \omega_o \alpha'_s \Psi_{sa} + \omega_o \alpha'_s k_r \Psi_{ra} - \frac{2}{3} u_3; \\ \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} &= u_{s\beta} - \omega_o \alpha'_s \Psi_{s\beta} + \omega_o \alpha'_s k_r \Psi_{r\beta}; \\ \frac{d\Psi_{ra}}{dt} &= -\omega_o \alpha'_r \Psi_{ra} + \omega_o \alpha'_r k_s \Psi_{sa} - \omega_p \Psi_{r\beta}; \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= -\omega_o \alpha'_r \Psi_{r\beta} - \omega_o \alpha'_r k_s \Psi_{s\beta} + \omega_p \Psi_{ra}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$M = \frac{3}{2} p \omega_o \frac{k_r}{\sigma x_s} (\Psi_{ra} \Psi_{s\beta} - \Psi_{sa} \Psi_{r\beta}), \quad (6)$$

где коэффициенты k_s , k_r , α'_s , α'_r и σ соответственно равны [2]:

$$\left. \begin{aligned} k_s &= \frac{x_m}{x_s}; & k_r &= \frac{x_m}{x_r}; \\ \alpha'_s &= \frac{r1}{\sigma x_s}; & \alpha'_r &= \frac{r2'}{\sigma x_r}; \\ \sigma &= 1 - \frac{x_m^2}{x_s x_r}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Обычно при моделировании уравнения электромеханического преобразования энергии записывают в относительных единицах путем введения базисных величин. Это позволяет упростить их, избавиться от громоздких коэффициентов и получить общие результаты. В настоящей статье используется система базисных величин, рекомендованная в [2]. При этом уравнения (5) и (6), записанные в относительных единицах, имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_{sa}^\circ}{dt^\circ} &= u_{sa}^\circ - \alpha'_s \Psi_{sa}^\circ + \alpha'_s k_r \Psi_{ra}^\circ - \frac{2}{3} u_3^\circ; \\ \frac{d\Psi_{s\beta}^\circ}{dt^\circ} &= u_{s\beta}^\circ - \alpha'_s \Psi_{s\beta}^\circ + \alpha'_s k_r \Psi_{r\beta}^\circ; \\ \frac{d\Psi_{ra}^\circ}{dt^\circ} &= -\alpha'_r \Psi_{ra}^\circ + \alpha'_r k_s \Psi_{sa}^\circ - \omega_p^\circ \Psi_{r\beta}^\circ; \\ \frac{d\Psi_{r\beta}^\circ}{dt^\circ} &= -\alpha'_r \Psi_{r\beta}^\circ - \alpha'_r k_s \Psi_{s\beta}^\circ + \omega_p^\circ \Psi_{ra}^\circ; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_p^\circ}{dt^\circ} = \frac{1}{H} \left[M^\circ - (M_c^\circ + M_T^\circ \cdot 1t_{TP} + M_m^\circ(\omega_p^\circ)) \text{sign} \omega_p \right]; \quad (9)$$

$$M^\circ = \frac{k_r}{\sigma x_s^\circ} (\Psi_{ra}^\circ \Psi_{s\beta}^\circ - \Psi_{sa}^\circ \Psi_{r\beta}^\circ); \tag{10}$$

$$H = \frac{33,79 J n_1^2}{S_{\text{баз}}}, \tag{11}$$

где H – момент инерции в относительных единицах; $S_{\text{баз}}$ – номинальная полная мощность двигателя, В·А; M_c – статический момент сопротивления; M_r – тормозной момент, возникающий в результате трения фрикционных накладок тормозного устройства (электромеханический тормоз); $M_m(\omega_p)$ – то же электромагнитной муфты скольжения (электромагнитный тормоз).

Относительные величины токов и потерь энергии определяются по формулам:

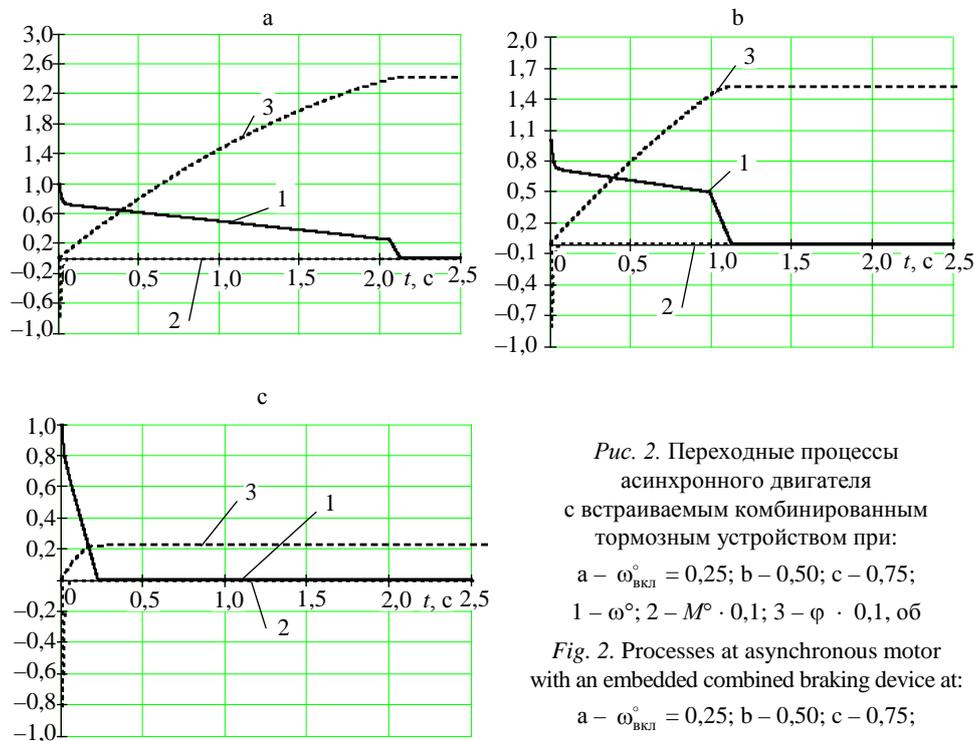
$$\left. \begin{aligned} i_{sa}^\circ &= \frac{1}{\sigma x_s^\circ} \Psi_{sa}^\circ - \frac{k_r}{\sigma x_s^\circ} \Psi_{ra}^\circ; \\ i_{s\beta}^\circ &= \frac{1}{\sigma x_s^\circ} \Psi_{s\beta}^\circ - \frac{k_r}{\sigma x_s^\circ} \Psi_{r\beta}^\circ; \\ i_{ra}' &= \frac{1}{\sigma x_r^\circ} \Psi_{ra}^\circ - \frac{k_s}{\sigma x_r^\circ} \Psi_{sa}^\circ; \\ i_{r\beta}' &= \frac{1}{\sigma x_r^\circ} \Psi_{r\beta}^\circ - \frac{k_s}{\sigma x_r^\circ} \Psi_{s\beta}^\circ; \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

$$\left. \begin{aligned} W_s^\circ &= r_1^\circ \int_0^{t^\circ} (i_{sa}^\circ{}^2 + i_{s\beta}^\circ{}^2) dt^\circ; \\ W_r^\circ &= r_1^\circ \int_0^{t^\circ} (i_{ra}'^2 + i_{r\beta}'^2) dt^\circ. \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

Формирование моделей для исследования на ЭВМ осуществляли на языке программирования Fortran 2008. Расчет системы дифференциальных уравнений (8)–(10) производили методом Рунге – Кутты. Переходные процессы АД с ВКТУ (АИР90 $J_{\text{мех}} = 2J_{\text{рот}}$, $M_c = 0,1M_H$) при $\omega_{\text{вкл}}^\circ = 0,25; 0,50; 0,75$ от номинальной представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, растормаживание электромеханического тормоза при различной скорости $\omega_{\text{вкл}}^\circ$ привело к разным значениям времени и путей торможения. Электроприводы производственных механизмов требуют различные характеристики торможения. Поэтому выбор $\omega_{\text{вкл}}^\circ$ для каждого электропривода должен производиться на основе требований к времени и пути торможения, к износостойкости тормозных накладок и плавности торможения. Например, если привод является электроприводом подачи, то

важна точная остановка (путь торможения). Для быстрых производственных процессов важно время торможения. Однако наиболее быстрая и точная остановка не всегда является наилучшей. Следует учитывать, что для многих производственных механизмов максимальное значение ускорения при замедлении (т. е. плавности торможения) ограничено. Так, для электроприводов грузоподъемных механизмов замедление не должно быть более $0,1-0,2 \text{ м/с}^2$ (предотвращается раскачивание груза) [3, 4]; для электроприводов, транспортирующих ковши с жидким расплавом, – более $0,25 \text{ м/с}^2$; для электроприводов самоходных машин – более $2,0 \text{ м/с}^2$ (исключается пробуксовка колес); для электроприводов цепных конвейеров – более $0,5 \text{ м/с}^2$ (уменьшаются динамические удары на цепь) [3, 5–7].



При торможении АД с ВКТУ помимо времени и пути торможения важный параметр – уменьшенный износ фрикционных накладок, что влияет на длительность бесперебойной работы электропривода. Как указано в [3], торможение на пониженной скорости существенно уменьшает износ фрикционных накладок электромеханического тормоза.

Из вышесказанного следует, что необходимо проанализировать и выбрать оптимальное значение $\omega_{\text{вкл}}$, при котором обеспечивается быстрая и точная остановка электропривода, а также имеют место пониженный износ и плавность торможения в АД с ВКТУ.

Зависимости пути торможения φ , времени торможения $t_{\text{тор}}$ и времени включения тормоза $t_{\text{вкл}}$ от скорости включения $\omega_{\text{вкл}}^{\circ}$ электромеханического тормоза для двигателя АИР90 ($J_{\text{мех}} = 2J_{\text{рот}}; J_{\text{мех}} = 3J_{\text{рот}}; M_{\text{с}} = 0,1M_{\text{н}}$) приведены на рис. 3.

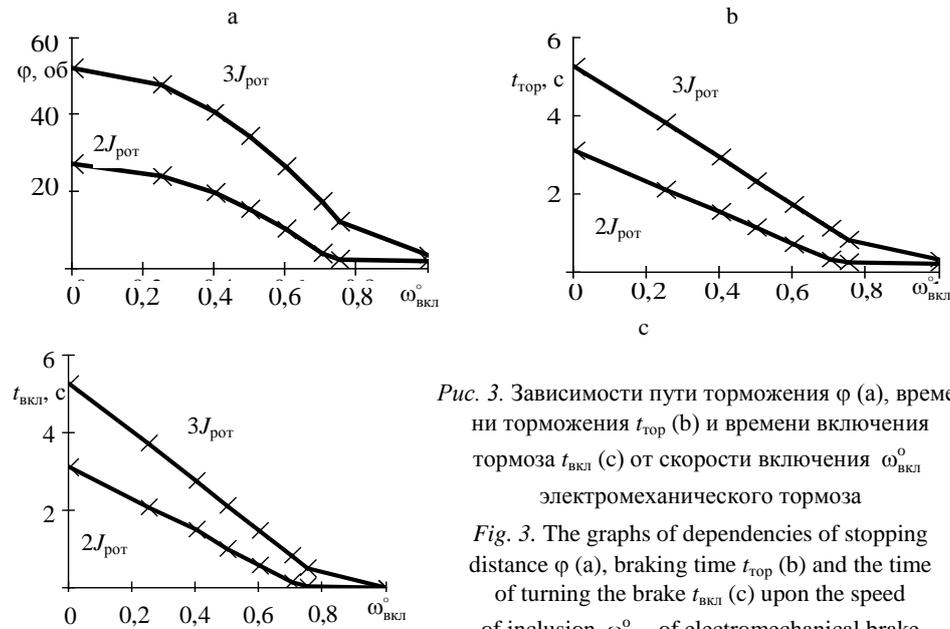


Рис. 3. Зависимости пути торможения φ (а), времени торможения $t_{\text{тор}}$ (б) и времени включения тормоза $t_{\text{вкл}}$ (с) от скорости включения $\omega_{\text{вкл}}^{\circ}$ электромеханического тормоза

Fig. 3. The graphs of dependencies of stopping distance φ (a), braking time $t_{\text{тор}}$ (b) and the time of turning the brake $t_{\text{вкл}}$ (c) upon the speed of inclusion $\omega_{\text{вкл}}^{\circ}$ of electromechanical brake

ВЫВОД

Анализ полученных графиков зависимостей показал, что оптимальным моментом включения электромеханического тормоза, обеспечивающим малые путь и время торможения, является момент при скорости $\omega_{\text{вкл}} = 0,6-0,8$ от номинальной. При этом допустимое число торможений для фрикционной накладки [3, 8–10] (по сравнению с механическим торможением) увеличится в $N = \frac{1}{(\omega_{\text{вкл}}^{\circ})^2} = \frac{1}{0,6^2} \div \frac{1}{0,8^2} = 1,6 \div 2,8$ раза. Экспериментальные исследования подтвердили правильность полученных математических моделей и выявленных закономерностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соленков, В. В. Математическая модель АД с встраиваемым комбинированным тормозным устройством / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 6. С. 24–31.
2. Сипайлов, Г. А. Математическое моделирование электрических машин / А. В. Сипайлов, А. В. Лоос. М.: Высш. шк., 1980. 176 с.

3. Александров, М. П. Тормозные устройства / М. П. Александров, А. Г. Лысяков. М.: Машиностроение, 1985. 312 с.
4. Яуре, А. Г. Крановый электропривод / А. Г. Яуре, Е. М. Певзнер. М.: Энергоатомиздат, 1988. 344 с.
5. Karl, E. Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology KEB (Germany) [Electronic Resource] / E. Karl // Directory Electromagnetic Techniques. 2015. № 8. Mode of Access: <http://www.keb.de>. Date of Access: 16.10.2015.
6. Karl, E. Brinkmann GmbH. Combinorm KEB (Germany) [Electronic Resource] / E. Karl // Directory Electromagnetic Techniques. 2000. № 8. Mode of Access: <http://www.keb.de>. Date of Access: 01.02.2008.
7. Марголин, Ш. М. Точная остановка электроприводов / Ш. М. Марголин. М.: Энергоатомиздат, 1984. 104 с.
8. Соленков, В. В. Асинхронные двигатели с электромеханическими тормозными устройствами / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2004. № 4. С. 28–32.
9. Гусельников, Э. М. Самотормозящиеся электродвигатели / Э. М. Гусельников, Б. С. Цукерман. М.: Энергия, 1971. 96 с.
10. Соленков, В. В. Асинхронный электродвигатель со встроенным комбинированным тормозным устройством на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика: Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 6. С. 20–24.

Поступила 14.12.2015 Подписана в печать 15.02.2016 Опубликовано онлайн 26.09.2016

REFERENCES

1. Solencov V. V., Brel V. V. (2013) Mathematical Model of Asynchronous Motor with Embedded Combined Braking Device. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (6), 24–31 (in Russian).
2. Sipaylov G. A., Loos A. V. (1980) *Mathematical Modeling of Electrical Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola. 176 (in Russian).
3. Aleksandrov M. P., Lysakov A. G. (1985) *Braking Devices*. Moscow, Mashinostroenie. 312 (in Russian).
4. Joure A. G., Pevzner E. M. (1988) *Crane Electric Drive*. Moscow, Energoatomizdat. 344 (in Russian).
5. Karl E. (2015) Brinkmann GmbH. Electromagnetic Technology KEB (Germany). *Directory Electromagnetic Techniques*, (8). Available at: <http://www.keb.de>. (Accessed 16 October 2015).
6. Karl E. (2000) Brinkmann GmbH. Combinorm KEB (Germany). *Directory Electromagnetic Techniques*, (8). Available at: <http://www.keb.de>. (Accessed: 1 February 2008).
7. Margolin S. M. (1984) *Accurate Termination of the Electric Actuator*. Moscow, Energoatomizdat. 104 (in Russian).
8. Salenkov V. V., Brel V. V. (2004) Asynchronous Motors with Electromechanical Brakes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (4), 28–32 (in Russian).
9. Guselnikov E. M., Zukerman B. S. (1971) *Self-Locking Electric Motors*. Moscow, Energiya. 96 (in Russian).
10. Salenkov V. V., Brel V. V. (2011) Asynchronous Electric Motor with Built-in Combined Braking Device Based on Electro-Mechanical Brake and Electro-Magnetic Clutch. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (6), 20–24 (in Russian).

Received: 14 December 2015 Accepted: 15 February 2016 Published online: 26 September 2016