

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-508-516>

УДК 621.31.83.52

Допустимый по условиям нагрева момент синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами

Б. И. Фираго¹⁾, С. В. Александровский¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Регулируемые электроприводы промышленных механизмов с постоянным статическим моментом могут работать в широком диапазоне изменения нагрузок и скоростей. При этом на любой скорости в заданном диапазоне они должны длительно работать с допустимым моментом, не перегреваясь. В большинстве случаев электродвигатели выполняют самовентилируемыми, с расположением вентилятора на валу электродвигателя. В этом случае охлаждение двигателя зависит от его скорости. Длительно допустимый момент электродвигателя на любой из скоростей при данной нагрузке определяется из уравнения теплового равновесия, где выделяемые в двигателе все потери мощности, превращаемые в теплоту, должны отводиться в окружающую среду, обеспечивая допустимую температуру изоляции обмоток при данной температуре окружающей (охлаждающей) среды. Уравнение теплового баланса составляется обычно для одномассовой тепловой модели электродвигателя, которой мы в этой статье воспользовались. Но даже при одномассовой модели получаем нелинейное уравнение теплового баланса. Чтобы получить приемлемые по сложности аналитические выражения для расчетов, приходится применять обоснованные допущения, что также использовано в расчетах авторов статьи. В результате были получены формулы, по которым можно находить длительно допустимый момент двигателя как функцию относительной скорости ротора при данной температуре окружающей среды. Для приводимых примеров приняли два значения температуры окружающей среды (20 и 40 °С – это стандартные значения, применяемые при тепловых расчетах электродвигателей). Зависимости относительного значения допустимого момента электродвигателя от относительной скорости (частоты) приведены для трех синхронных двигателей с постоянными магнитами мощностью 3; 25 и 250 кВт.

Ключевые слова: синхронный двигатель, частотное управление, допустимый момент, уравнение теплового равновесия

Для цитирования: Фираго, Б. И. Допустимый по условиям нагрева момент синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 508–516. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-508-516>

Адрес для переписки

Фираго Бронислав Иосифович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
eapu@bntu.by

Address for correspondence

Firago Bronislav I.
Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-61
eapu@bntu.by

The Permissible under Heating Conditions Torque of a Frequency-Controlled Synchronous Motor of Permanent Magnets

B. I. Firago¹⁾, S. V. Aleksandrovsky¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The variable speed electrical drives for industrial mechanisms with a constant static torque usually operate in a large range of speeds and loads. Along with this, for any speed of a given range the electrical drive motor is to provide a continuous permissible torque without overheating. Mostly the electrical motors have self-ventilation; the ventilator being located on the motor shaft. In such motors heat dissipation depends on a motor speed. The permissible continuous motor torque is determined out of a heat balance equation where power losses being converted into heat must be transferred in the ambient space and the motor temperature must not be over a permitted level for a given class of winding insulation under the certain ambient temperature. A heat balance equation is usually obtained on a basis of a one-mass motor heat model, i. e. the model that was used in this research. But even the one-mass heat model gives a non-linear heat balance equation. In order to get convenient analytical expressions out of the motor heat balance equation, it is necessary to take some justified assumptions; the latter was also implemented in this research. As a result, formulas have been obtained by which the long-term permissible motor torque can be calculated as a function of the relative speed of the rotor at a given ambient temperature. For the examples presented in the articles we chose (20 and 40 °C as a standard temperature for the thermal calculation of electrical machines). Dependences of a relative permissible continuous motor torque μ on a relative frequency value (or relative rotor speed) are presented for three synchronous motors with permanent magnets and rated power of 3; 25 and 250 kW.

Keywords: synchronous motor, frequency control, permissible torque, heat balance equation

For citation: Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2018) The Permissible under Heating Conditions Torque of a Frequency-Controlled Synchronous Motor of Permanent Magnets. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (6). 508–516. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-508-516> (in Russian)

Введение

При регулировании скорости синхронного двигателя (СД) вниз от основной ухудшаются условия охлаждения и возникает проблема определения его допустимой нагрузки с соблюдением предельных температур. Если статический момент зависит от скорости (турбомеханизмы), то такая проблема обычно не проявляется. Но при постоянном статическом моменте (например, грузоподъемные механизмы) уменьшение скорости вала СД непосредственно влияет на теплоотдачу и, следовательно, на допустимый момент нагрузки [1, 2].

В связи с этим представляет интерес найти аналитическую зависимость допустимого момента синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами от скорости и параметров электропривода при различной температуре окружающей среды.

Аналитическое исследование допустимого по условиям нагрева синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами

Рассмотрим синхронный двигатель с постоянными магнитами, расположенными на поверхности ротора. Полагаем, что потери мощности в ро-

торе отсутствуют, за исключением механических потерь [3–5]. В этом случае допустимый по условиям нагрева момент СД будет определяться равенством/неравенством [1, 6]

$$\beta_{\text{охл}} \Delta P_{\text{ном}} \geq \Delta P_{\text{пер.1}} + \Delta P_{\text{ст.1}} + \Delta P_{\text{мх}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{ном}}$ – номинальные потери электродвигателя, определяемые как

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \frac{1 - \eta_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}};$$

$P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность электродвигателя; $\eta_{\text{ном}}$ – номинальный КПД двигателя, о. е.; $\Delta P_{\text{пер.1}}$ – переменные потери мощности в статоре СД при данных угловой скорости ω и токе I_1 , которые для трехфазного СД можно записать

$$\Delta P_{\text{пер.1}} = 3I_1^2 R_1;$$

R_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора; $\Delta P_{\text{ст.1}}$ – потери в стали статора, которые при постоянном магнитном потоке взаимоиנדукции определяются [6]

$$\Delta P_{\text{ст.1}} = \Delta P_{\text{ст.1,ном}} \left(\frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} \right)^q;$$

$f_1, f_{1\text{ном}}$ – текущее и номинальное значение частоты изменения напряжения статора; $\Delta P_{\text{ст.1,ном}}$ – номинальные потери в стали СД; q – показатель степени, который находится в пределах 1,3–1,5 (для современных электротехнических сталей рекомендуется принимать $q = 1,5$); $\Delta P_{\text{мх}}$ – механические потери мощности, которые с учетом вентиляционных потерь принимают пропорциональными квадрату скорости двигателя ω ,

$$\Delta P_{\text{мх}} = \Delta P_{\text{мх,ном}} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2;$$

$\Delta P_{\text{мх,ном}}$ – номинальные механические потери мощности СД.

Потери мощности рассматривают для установившегося режима, тогда для СД имеем

$$\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} = \frac{\omega_0}{\omega_{0\text{ном}}} = \frac{f_1}{f_{1\text{ном}}} = \alpha,$$

где $\omega_0, \omega_{0\text{ном}}$ – соответственно синхронная угловая скорость СД при текущей частоте f_1 и при $f_1 = f_{1\text{ном}}$.

Рассмотрим первую зону регулирования скорости, когда $\omega_{\text{мин}} \leq \omega \leq \omega_{\text{ном}}$, для самовентилируемого синхронного частотно-регулируемого двигателя,

где коэффициент ухудшения охлаждения $\beta_{\text{охл}}$ самовентилируемого СД можно представить выражением [6, 7]

$$\beta_{\text{охл}} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \sqrt{\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}}} = \beta_0 + (1 - \beta_0) \sqrt{\alpha},$$

где β_0 – коэффициент ухудшения охлаждения при $\omega = 0$, т. е. при неподвижном роторе двигателя (его усредненные значения в зависимости от исполнения электродвигателя приведены в [6, 8]).

С учетом изложенного можно записать уравнение теплового баланса СД (1) для данной относительной частоты α в виде

$$(\beta_0 + (1 - \beta_0) \sqrt{\alpha}) \Delta P_{\text{ном}} \geq \Delta P_{\text{пер.1}} + \Delta P_{\text{ст.1,ном}} \alpha^{1.5} + \Delta P_{\text{мх}} \alpha^2. \quad (2)$$

Найдем зависимость переменных потерь в статоре $\Delta P_{\text{пер.1}}$ частотно-регулируемого СД с постоянными магнитами от α и электромагнитного момента M синхронного неявнополюсного двигателя.

В [8, с. 303] получено уравнение (10.224) для тока статора I_1 неявнополюсного СД в виде

$$I_1 = \frac{U_1}{X_c} \sqrt{E_1^2 - 2E_1U_1 \cos \theta_{\text{эл}} + U_1^2}, \quad (3)$$

где U_1 , E_1 – действующее значение фазного напряжения и ЭДС статора; $\theta_{\text{эл}}$ – электрический угол нагрузки угловой характеристики синхронного двигателя, который связан с синхронным электромагнитным моментом соотношением

$$\frac{M}{M_{\text{син.мах}}} = \frac{\sin \theta_{\text{эл}}}{\sin \theta_{\text{эл,мах}}};$$

$M_{\text{син.мах}}$ – максимальное значение синхронного электромагнитного момента; $\theta_{\text{эл,мах}}$ – угол нагрузки, соответствующий $M_{\text{син.мах}}$.

Как показано в [9], в частотно-регулируемом электроприводе, работающем при номинальном магнитном потоке, все величины, входящие в выражение максимального электромагнитного момента

$$M_{\text{син.мах}} = \frac{3U_1E_1}{\omega_0 X_c},$$

изменяются пропорционально относительной частоте α :

$$U_1 = U_{1\text{ном}} \alpha; \quad E_1 = E_{1\text{ном}} \alpha;$$

$$\omega_0 = \omega_{0\text{ном}} \alpha; \quad X_c = X_{c,\text{ном}} \alpha,$$

где X_c , $X_{c,\text{ном}}$ – синхронное индуктивное сопротивление неявнополюсного двигателя при текущей частоте f_1 и при $f_1 = f_{1\text{ном}}$.

Учитывая эти соотношения в выражении тока статора I_1 (3), получим

$$I_1 = \frac{1}{X_{c,ном}} \sqrt{E_{1ном}^2 - 2E_{1ном}U_{1ном} \cos \theta_{эл} + U_{1ном}^2}. \quad (4)$$

Для неявнополюсного СД можно принять $\theta_{эл,мах} = 90^\circ$.
Обозначим

$$\mu^* = \frac{M}{M_{снн.мах}} = \frac{\sin \theta_{эл}}{\sin \theta_{эл,мах}} = \sin \theta_{эл}.$$

Выразим

$$\cos \theta_{эл} = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_{эл}} = \sqrt{1 - \mu^{*2}}.$$

Теперь уравнение (4) для тока статора I_1 запишем в виде

$$I_1 = \frac{U_{1ном}}{X_{c,ном}} \sqrt{\left(\frac{E_{1ном}}{U_{1ном}}\right)^2 - 2\frac{E_{1ном}}{U_{1ном}}\sqrt{1 - \mu^{*2}} + 1}.$$

Обозначим:

$$a = \frac{E_{1ном}}{U_{1ном}}; \quad I_{1,k} = \frac{U_{1ном}}{X_{c,ном}} \quad \text{— ток короткого замыкания СД; } i_1^* = \frac{I_1}{I_{1,k}} \quad \text{— отно-}$$

сительный к току короткого замыкания ток статора СД.

В результате уравнение для тока статора СД можно записать в указанных относительных единицах

$$i_1^* = \sqrt{a^2 - 2a\sqrt{1 - \mu^{*2}} + 1}.$$

Рассмотрим

$$i_1^{*2} = a^2 - 2a\sqrt{1 - \mu^{*2}} + 1.$$

Обозначим $\mu^{*2} = Z$. Очевидно, что $Z \ll 1$, поэтому можно разложить функцию $\sqrt{1 - \mu^{*2}} = \sqrt{1 - Z}$ в степенной ряд, взяв первые два члена:

$$\sqrt{1 - Z} = 1 - \frac{1}{2}Z = 1 - \frac{1}{2}\mu^{*2}.$$

Но чаще всего используются относительные величины по отношению к номинальным, а не максимальным значениям, т. е.

$$i_1 = \frac{I_1}{I_{1ном}}; \quad \mu = \frac{M}{M_{ном}}.$$

Можно найти связь между этими двумя видами относительных единиц [8]

$$i_1^* = \frac{I_1}{I_{1,k}} = \frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} X_c^* = i_1 X_c^*, \quad (5)$$

где X_c^* – относительная величина синхронного индуктивного сопротивления;

$$\mu^* = \frac{M}{M_{\text{син.мах}}} = \frac{M}{M_{\text{ном}}} \cdot \frac{1}{\lambda_m} = \frac{\mu}{\lambda_m}; \quad (6)$$

λ_m – номинальная перегрузочная способность СД по моменту.

Принимая во внимание приведенные соотношения для относительных величин (5) и (6), можем записать квадрат относительного тока статора

$$i_1^2 = \left(\frac{I_1}{I_{1\text{ном}}} \right)^2 = \left(\frac{a}{X_c^*} \right)^2 - \frac{2a}{X_c^{*2}} + \frac{1}{X_c^{*2}} + \frac{a\mu^2}{(\lambda_m X_c^*)^2},$$

которому пропорциональны текущие значения потерь мощности в статоре:

$$\Delta P_{\text{пер.1}} = \Delta P_{\text{пер.1,ном}} i_1^2,$$

где

$$\Delta P_{\text{пер.1}} = 3I_1^2 R_1;$$

$$a = \frac{E_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = \frac{\cos \phi_{\text{ном}}}{\cos(\phi_{\text{ном}} - \theta_{\text{эл,ном}})};$$

$$\theta_{\text{эл,ном}} = \arcsin \left(\frac{1}{\lambda_m} \right).$$

Теперь уравнение теплового баланса (2) для синхронного самовентилируемого двигателя приобретает вид

$$\begin{aligned} & (\beta_0 + (1 - \beta_0)\sqrt{\alpha}) \Delta P_{\text{ном}} \geq \Delta P_{\text{ст.1,ном}} \alpha^{1,5} + \Delta P_{\text{мх}} \alpha^2 + \\ & + \Delta P_{\text{пер.1,ном}} \left[\left(\frac{a}{X_c^*} \right)^2 - \frac{2a}{X_c^{*2}} + \frac{1}{X_c^{*2}} \right] + \Delta P_{\text{пер.1,ном}} \frac{a}{(\lambda_m X_c^*)^2} \mu^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Введем относительные потери мощности в синхронном двигателе:

$$\begin{cases} p_1^* = \frac{\Delta P_{\text{ст.1,ном}}}{\Delta P_{\text{ном}}}; \\ p_2^* = \frac{\Delta P_{\text{мх,ном}}}{\Delta P_{\text{ном}}}; \\ p_3^* = \frac{\Delta P_{\text{пер.1,ном}}}{\Delta P_{\text{ном}}}, \end{cases} \quad (8)$$

а также обозначим:

$$A = \frac{p_3^* a}{(\lambda_m X_c^*)^2}; \quad (9)$$

$$B = p_3^* \left[\left(\frac{a}{X_c^*} \right)^2 - \frac{2a}{X_c^{*2}} + \frac{1}{X_c^{*2}} \right]. \quad (10)$$

Теперь уравнение теплового баланса (7) можно записать

$$\beta_0 + (1 - \beta_0)\sqrt{\alpha} = p_1^* \alpha^{1.5} + p_2^* \alpha^2 + B + A\mu^2$$

или

$$\mu^2 = q_0 + q_1 \sqrt{\alpha} - q_2 \alpha^{1.5} - q_3 \alpha^2,$$

где

$$\begin{cases} q_0 = \frac{\beta_0 - B}{A}; \\ q_1 = \frac{1 - \beta_0}{A}; \\ q_2 = \frac{p_1^*}{A}; \\ q_3 = \frac{p_2^*}{A}. \end{cases} \quad (11)$$

Принимаем $\mu = \mu_{\text{доп}}$ и находим зависимость относительного допустимого момента синхронного двигателя от относительной частоты α , т. е. относительной угловой скорости ротора

$$\mu_{\text{доп}} = \sqrt{q_0 + q_1 \sqrt{\alpha} - q_2 \alpha^{1.5} - q_3 \alpha^2}. \quad (12)$$

Расчет допустимого по условиям нагрева момента синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами

Для иллюстрации теоретических исследований проведены расчеты по полученным формулам (8)–(12) для синхронных частотно-регулируемых двигателей [10] мощностью 3 кВт (рис. 1), 25 кВт (рис. 2) и 220 кВт (рис. 3) для температуры окружающей среды 40 и 20 °С.

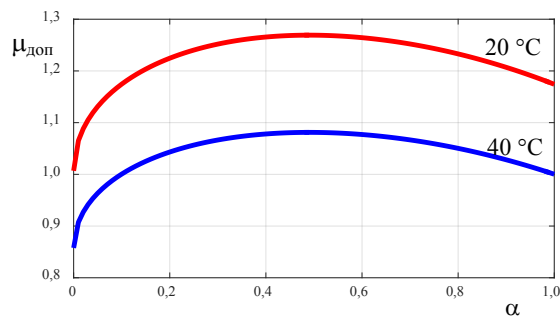


Рис. 1. Зависимость относительного допустимого момента $\mu_{\text{доп}}$ от относительной частоты α для синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами типа LSRPM90SL мощностью 3 кВт

Fig. 1. Dependence of a relative permissible torque μ_{al} upon a relative frequency α for the synchronous frequency-controlled motor of permanent magnets of LSRPM90SL type with rated power of 3 kW

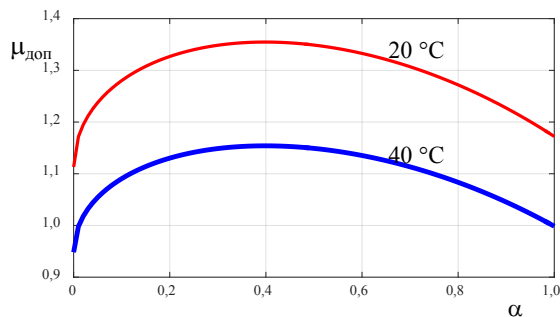


Рис. 2. Зависимость относительного допустимого момента $\mu_{\text{доп}}$ от относительной частоты α для синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами типа LSRPM200L мощностью 25 кВт

Fig. 2. Dependence of a relative permissible torque μ_{al} upon a relative frequency α for the synchronous frequency-controlled motor of permanent magnets of LSRPM200L type with rated power 25 kW

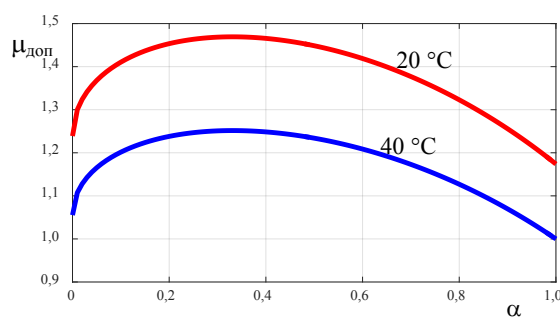


Рис. 3. Зависимость относительного допустимого момента $\mu_{\text{доп}}$ от относительной частоты α для синхронного частотно-регулируемого двигателя с постоянными магнитами типа LSRPM315MR мощностью 220 кВт

Fig. 3. Dependence of a relative permissible torque μ_{al} upon a relative frequency α for the synchronous frequency-controlled motor of permanent magnets of LSRPM315MR type with rated power 220 kW

ВЫВОД

Разработана методика расчета допустимого по условиям нагрева момента частотно-регулируемого синхронного самовентилируемого электродвигателя, которая может быть использована при выборе мощности и проверке длительно допустимого момента электродвигателя, работающего при разных нагрузках, скоростях и температурах окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуйский, В. И. Расчет электрических машин: пер. с нем. / В. И. Шуйский. М.: Энергия, 1968. 732 с.
2. Брускин, Д. Э. Электрические машины. Ч. 2 / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1987. 325 с.
3. Осин, И. Л. Электрические машины: синхронные машины / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян. М.: Высш. шк., 1990. 304 с.
4. Kaczmarek, T. Układy Napędowe z Silnikiem Synchronicznym / T. Kaczmarek, K. Zawirski // Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. 2000.
5. Stoinski, M. Materiały Magnetyczne w Technice / M. Stoinski. Warszawa: COSIN SEP, 2000. 251 p.
6. Фираго, Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: Техноперспектива, 2007. 585 с.
7. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Энергия, 1980. 928 с.
8. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
9. Фираго, Б. И. Исследование переходных процессов в частотно-регулируемом синхронном электроприводе / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 507–518. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-507-518>.
10. LeroySomer: Синхронные электродвигатели с постоянными магнитами в алюминиевом корпусе LSRPM, 0.75 to 400 kW. Технический каталог. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.privodsys.ru/upload/medialibrary/f2b/f2bac939df10493e151b2be2ae152eee.pdf>.

Поступила 12.03.2018 Подписана в печать 14.05.2018 Опубликовано онлайн 28.11.2018

REFERENCES

1. Shuiskii V. I. (1968) *Calculation of Electric Machines*. Moscow, Energia Publ. 732 (in Russian).
2. Bruskin D. E., Zorokhovich A. E., Khvostov V. S. (1987) *Electric Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 325 (in Russian).
3. Osin I. L., Shakarian Yu. G. (1990) *Electric Machines: Synchronous Machines*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 304 (in Russian),
4. Kaczmarek T., Zawirski K. (2000) *Electrical Drives with a Synchronous Motor*. Poznan Technical University (in Poland).
5. Stoinski M. (2000) *Magnetic Materials in Technical Applications*. Warsaw, COSIN SEP. 251 (in Poland).
6. Firago B. I., Pawlaczyk L. B. (2007) *The Theory of Electrical Drives*. Minsk, Technoperspektiva Publ. 585 (in Russian).
7. Ivanov-Smolenskii A. V. (1980) *Electrical Machines*. Moscow, Energia Publ. 928 (in Russian).
8. Firago B. I., Pawlaczyk L. B. (2006) *Regulated Alternative Current Drives*. Minsk, Technoperspektiva Publ. 363 (in Russian).
9. Firago B. I., Aleksandrovsky S. V. (2016) The Study of Transient Processes of the Frequency-Regulated Synchronous Electric Drive. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 507–518 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-507-518>.
10. *LSRPM. Synchronous Motors with Permanent Magnets Aluminium Alloy Housing, 0.75 to 400 kW. Technical Catalogue*. Available at: <http://www.privodsys.ru/upload/medialibrary/f2b/f2bac939df10493e151b2be2ae152eee.pdf> (in Russian).

Received: 12 March 2018

Accepted: 14 May 2018

Published online: 28 November 2018