

Ограничение бросков тока в электроприводах, содержащих асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором

ШАМСИЕВ М.В., АБДУЛКЕРИМОВ С.А., ШАМСИЕВ А.М.

Предлагается способ ограничения бросков тока в электроприводах с тяжелыми условиями пуска и резкопеременной нагрузкой, содержащих асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, на основе включения индуктивности в статорную цепь асинхронного двигателя через неуправляемый выпрямитель. Во время пуска двигатель должен развивать повышенный момент, необходимый, во-первых, для преодоления момента сопротивления разгоняемой машины и, во-вторых, для зарядки кинетической энергией инерционных масс. В связи с этим двигатель потребляет большое количество энергии, что выражается увеличенным пусковым током из сети и повышенным нагревом обмоток. Представлена методика расчета основных параметров индуктивности и переходных процессов. Анализируются достоинства и область применимости данного способа.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электропривод, асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, индуктивность

Пусковой ток асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором достигает 5–8-кратного значения номинального тока. Во время пуска двигатель должен развивать повышенный момент, необходимый, во-первых, для преодоления момента сопротивления разгоняемой машины и, во-вторых, для зарядки кинетической энергией инерционных масс. В связи с этим двигатель потребляет большое количество энергии, что выражается увеличенным пусковым током из сети и повышенным нагревом обмоток [1, 2].

Начальный пусковой момент или момент трогания двигателя должен превышать суммарный противодействующий момент приводимой машины минимум на 15–20%, а если ожидается падение напряжения в сети при пуске, то на 30–50%, с тем чтобы обеспечить надежный пуск электропривода даже при падении напряжения и квадратичном снижении начального момента:

$$M'_n = M_n (u' / u)^2.$$

В маломощной сети толчки тока вызывают значительное падение напряжения и тем самым отрицательно влияют на работу других приемников. Падение напряжения в сети, в свою очередь, зависит от соотношения между значениями мощности пускаемого в ход двигателя и питающего его трансформатора.

В [3] приведены значения предельных мощностей короткозамкнутых двигателей, при которых возможен пуск при полном напряжении сети:

Источник питания	Значение предельной мощности короткозамкнутого двигателя
Трансформатор, питающий сеть, которая является одновременно и силовой, и осветительной	4% мощности трансформатора при частых пусках 8% мощности трансформатора при редких пусках

Трансформатор, питающий чисто силовую сеть	20% мощности трансформатора при частых пусках 30% мощности трансформатора при редких пусках
Электростанция малой мощности	12% мощности электростанции

Продолжительность пуска электроприводов примерно составляет: для центробежного насоса – от 2 до 15 с; компрессора – от 5 до 20 с; ленточного транспортера – от 10 до 20 с; пресса с маховиком – от 15 до 60 с.

Различают три режима пуска: легкий, тяжелый и весьма тяжелый. Пуск при полной нагрузке, когда момент сопротивления остается в процессе пуска практически постоянным ($M_n = 40 \div 100\% M_H$), – тяжелый режим пуска: электроприводы металлорежущих станков, центробежных насосов и вентиляторов, а также компрессоров, пускаемых при открытой задвижке.

Пуск при повышенном моменте трогания ($M_n = 100 \div 250\% M_H$) – весьма тяжелый режим пуска: электроприводы экскаваторов, прокатных станков, шахтных подъемных машин, электровозы.

Вне этой классификации – случаи тяжелого режима пуска механизмов с малым статическим моментом и весьма большими инерционными массами: пуск сахарных центрифуг с повышенной продолжительностью, когда приходится думать о сокращении потерь энергии и предупреждать опасный перегрев двигателя в процессе пуска. Повышенный нагрев при пуске создает ограничения для двигателей электроприводов, требующих частых пусков (например, во вспомогательных устройствах прокатных станков; в некоторых металлорежущих станках-автоматах; в крановых механизмах и др.).

В этом ряду следует также учесть электроприводы буровых станков, дробилок, мельниц, для кото-

рых характерна работа с резкопеременной нагрузкой (M_{Π} колеблется от 0,5 до $2,5M_H$).

Таким образом, можно констатировать, что эффект тяжелого пуска и резкопеременной нагрузки АД с короткозамкнутым ротором [4, 5]:

- 1) отрицательно влияет на питающую сеть с преждевременным выходом из строя её элементов;
- 2) отрицательно влияет на электропотребителей, работающих параллельно в этой сети;
- 3) вызывает преждевременный выход из строя статорной обмотки АД, подшипников, узлов редукторов рабочих механизмов.

Предлагалось множество путей решения этой проблемы: от классических (пусковые резисторы с последующим их шунтированием, переключающие схемы со звезды на треугольник, полупроводниковые регуляторы и компенсаторы [6]) до предложенных изменения конструкции статорной обмотки [7].

Общими недостатками классических способов является сложность, дороговизна и, как следствие, снижение надежности, а изменение конструкции обмотки предполагает отказ от серийных двигателей, что также нецелесообразно. Предлагается способ включения индуктивности в статорную цепь двигателя через неуправляемый выпрямитель, т.е. исключаются какие-либо переключатели или электронные схемы управления и, как следствие, повышается надежность.

Кроме того, следует учесть, что индуктивность остается в цепи постоянно и, следовательно, её действие проявляется не только при пуске, но и при резкопеременной нагрузке, т.е. она исполняет роль постоянного «электрического демпфера».

Широкое использование данного способа предполагает решение следующих задач.

1. Расчет и выбор оптимального значения индуктивности, позволяющего осуществлять заданную степень стабилизации (или ограничения) тока статора при минимальных весе, габаритах и стоимости.

2. Определение границ применимости данного подхода с технико-экономическим обоснованием для конкретных систем электропривода.

3. Обеспечение устойчивой работы электропривода во всех рабочих режимах, особенно для электроприводов с разветвленной системой сложных обратных связей.

В случае работы АД на линейном участке механической характеристики при $S > S_{кр}$ электромеханические переходные процессы с достаточной степенью точности описываются системой уравнений [8, 9]:

$$M + T_{\Sigma} \frac{dM}{dt} = \beta(\omega_0 - \omega);$$

$$M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt},$$

где $T_{\Sigma} = \frac{1}{\omega_0 p S_k}$ – электромагнитная постоянная времени двигателя; β – жесткость характеристики.

Структурная схема электропривода, соответствующая этой системе уравнений, показана на рис. 1.

Включение дополнительной индуктивности в цепь статора приводит к увеличению T_{Σ} , а если учитывать её внутреннее сопротивление, то – и к увеличению β .

Условием устойчивости контура $\omega - \omega_0$ являются выражения:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{\frac{\beta}{T_{\Sigma} J_{\Sigma} p^2 + J_{\Sigma} p}}{1 + \frac{\beta}{T_{\Sigma} J_{\Sigma} p^2 + J_{\Sigma} p}} = \frac{\beta}{T_{\Sigma} J_{\Sigma} p^2 + J_{\Sigma} p + \beta},$$

$T_{\Sigma} J_{\Sigma} > 0; J_{\Sigma} > 0; \beta > 0$, что, естественно, выполняется.

При решении задачи расчета необходимой индуктивности для заданного ограничения тока статора *при пуске*, как наиболее тяжелого и актуального режима работы, следует исходить из следующего.

1. Полное сопротивление фазы двигателя

$$Z_k = \frac{U_H}{1,73 I_{\Pi}}.$$

2. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{\Pi} = \cos \varphi_H \left[\frac{M_{\Pi}}{M_H} \frac{\eta_H}{(1-s_H)k_i} + \gamma k_i (1-\eta_H) \right],$$

где $k_i = I_{\Pi} / I_H$ – кратность пускового тока; $\gamma = 1/3$ – отношение потерь в меди к номинальным поте-

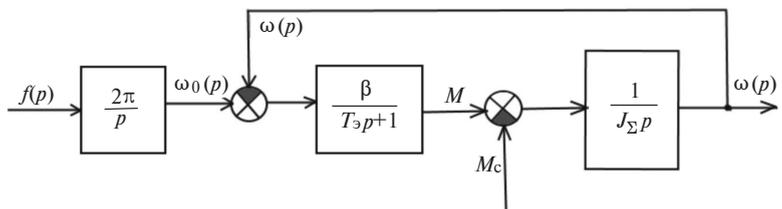


Рис. 1

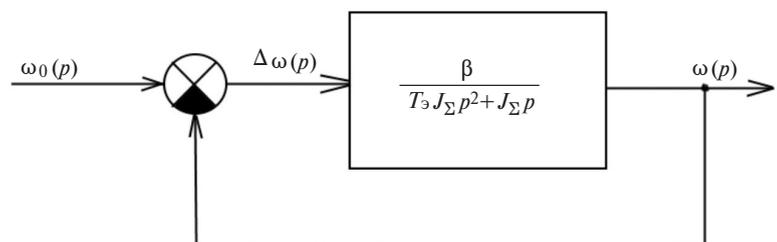


Рис. 2

рям; M_{Π} / M_{H} – кратность пускового момента; s_{H} , $\cos \varphi_{\text{H}}$, η_{H} – номинальное скольжение, коэффициент мощности и КПД двигателя соответственно.

3. Активное и индуктивное сопротивление фазы двигателя:

$$R_k = Z_k \cos \varphi_{\Pi}; \quad X_k = Z_k \sin \varphi_{\Pi}.$$

4. Пусковое индуктивное сопротивление в цепи статора:

$$X_{\text{д}} = \sqrt{\left(\frac{Z_k}{\alpha}\right)^2 - R_k^2} - X_k,$$

где $\alpha = I_{\text{п.и}} / I_{\Pi}$ – коэффициент требуемого снижения тока; $I_{\text{п.и}}$ – пусковой ток при наличии ограничивающей индуктивности; I_{Π} – то же при отсутствии ограничивающей индуктивности.

Пример: для двигателя 11 кВт, 380 В, 685 об/мин рассчитать пусковую индуктивность в цепи статора для снижения пускового тока в 2 раза ($\alpha = 0,5$) при $M_{\Pi} / M_{\text{H}} = 3$; $I_{\text{п.и}} / I_{\Pi} = 4,5$; $\cos \varphi_{\text{H}} = 0,73$;

$$I_{\text{H}} = 28,8 \text{ А}; \quad J_{\text{д}} = 0,4 \text{ кг·м}^2;$$

1) номинальное скольжение

$$s_{\text{H}} = \frac{n_{\text{с}} - n_{\text{H}}}{n_{\text{с}}} = \frac{750 - 685}{750} = 0,087;$$

2) КПД двигателя

$$\eta_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}} 1000}{\sqrt{3} U_{\text{H}} I_{\text{H}} \cos \varphi_{\text{H}}} = \frac{11 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 28,8 \cdot 0,73} = 0,795;$$

3) коэффициент мощности при пуске

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{\Pi} &= \cos \varphi_{\text{H}} \left[\frac{M_{\Pi}}{M_{\text{H}}} \frac{\eta_{\text{H}}}{(1 - s_{\text{H}}) k_i} + \gamma k_i (1 - \eta_{\text{H}}) \right] = \\ &= 0,73 \left[3 \frac{0,795}{0,913 \cdot 4,5} + 4,5 \frac{1}{3} \cdot 0,205 \right] = 0,65; \end{aligned}$$

4) пусковой ток двигателя

$$I_{\Pi} = 4,5 \cdot 28,8 = 130 \text{ А};$$

5) полное сопротивление фазы двигателя при пуске

$$Z_k = \frac{U_{\text{H}}}{\sqrt{3} I_{\Pi}} = \frac{380}{1,73 \cdot 130} = 1,7 \text{ Ом};$$

6) активное и индуктивное сопротивления фазы двигателя при пуске:

$$R_k = Z_k \cos \varphi_{\Pi} = 1,7 \cdot 0,65 = 1,1 \text{ Ом};$$

$$X_k = Z_k \sin \varphi_{\Pi} = 1,7 \cdot 0,76 = 1,29 \text{ Ом};$$

7) пусковое индуктивное сопротивление в цепи статора

$$X_{\text{д}} = \sqrt{\left(\frac{Z_k}{\alpha}\right)^2 - R_k^2} - X_k = \sqrt{\left(\frac{1,7}{0,5}\right)^2 - 1,1^2} - 1,29 = 1,92 \text{ Ом};$$

8) значение пусковой индуктивности

$$L_{\text{д}} = \frac{X_{\text{д}}}{\omega} = \frac{1,92}{314} = 0,006 \text{ Гн} = 6 \text{ мГн}.$$

Если исходить из расчетного значения индуктивности $L = 6$ мГн и ограничения пускового тока в 2 раза, т.е. через индуктивность при пуске будет проходить ток $I_{\Pi} / 2 = 130 / 2 = 65$ А, то по условиям нагрева, термической и механической устойчивости целесообразно использовать для катушки индуктивности медный провод сечением 16 мм^2 при диаметре $4,5$ мм. Для катушки индуктивности без магнитопровода (рис. 3) характерны параметры: D – диаметр каркаса катушки, мм; l – длина катушки, мм.

Необходимое число витков катушки:

$$n = 10 \sqrt{5L(0,9D + 2l)} / D.$$

Здесь L – индуктивность катушки, мкГн.

При $l = D = 100$ мм и $L = 6000$ мкГн число витков n равно 295.

При $d = 4,5$ мм в одном слое уместится 22 витка, поэтому число слоев катушки: $295 / 22 = 14$; толщина катушки $14 \cdot 4,5 = 63$ мм. Таким образом, ширина катушки равна $100 + 2 \cdot 63 = 226$ мм при высоте $100 + 2 \cdot 50 = 200$ мм. Средняя длина витка $\pi d_{\text{ср}} = 3,14 \cdot 163 = 512$ мм; общая длина провода $512 \cdot 295 \approx 151$ м.

При этом активное сопротивление катушки с учётом $\rho_{\text{меди}} = 1,15$ Ом/км равно $R_k = 0,151 \cdot 1,15 = 0,174$ Ом.

Для расчета переходного процесса (нарастания тока при пуске) можно воспользоваться эквивалентной схемой замещения рис. 4 [10], где $L_k = x_k / \omega = 1,29 / 314 = 0,004$ Гн, при допущении, что $R_{\text{д}} \approx 0$.

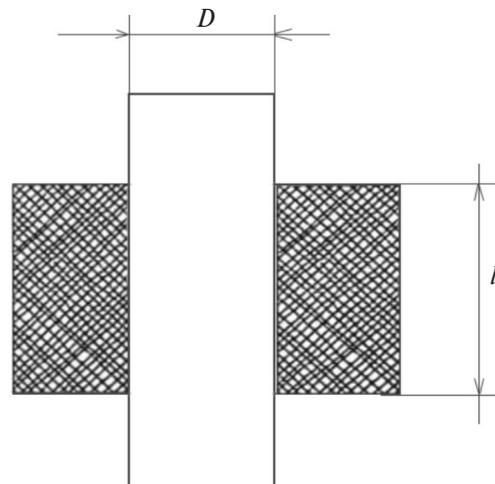


Рис. 3

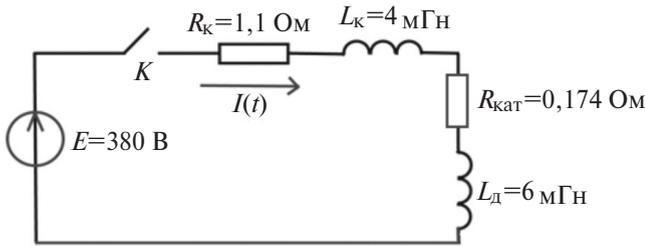


Рис. 4

$$I(t) = C_0 + C_1 e^{p_1 t};$$

$$R_k + R_{кат} + p_1(L_k + L_д) = 0;$$

$$1,274 + p_1 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0.$$

$$\text{Отсюда } p_1 = -\frac{1,274}{10^{-2}} \approx -127.$$

$$\text{При } t=0 \quad I(0) = C_0 + C_1 = 0; \quad \text{при } t=\infty$$

$$I(\infty) = 380/1,274 = C_0 = 298,27 \text{ А.}$$

$$\text{Следовательно, } C_1 = -298,27 \text{ А,} \quad \text{отсюда}$$

$$I(t) = 298,27(1 - e^{-127t}) \text{ А.}$$

Нетрудно показать, что половинный пусковой ток достигается за время:

$$298,27(1 - e^{-127t}) = 65;$$

$$1 - e^{-127t} = \frac{65}{298,27} = 0,218;$$

$$e^{-127t} = 1 - 0,218 = 0,782;$$

$$-127t \ln e = \ln 0,782 = -0,246;$$

$$t = 0,00194 \text{ с} = 1,94 \text{ мс.}$$

За это время при

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{11 \cdot 1000}{3,14 \cdot 685/30} = \frac{33 \cdot 10^4}{2150,9} = 153,4 \text{ Нм}$$

$$M_{II} = 3 \cdot 153,4 = 460,2 \text{ Нм.}$$

В среднем принимается $M_H = 0,5 M_{II} = 76,7 \text{ Нм.}$

$$J_M = J_{д}/2 = 0,4/2 = 0,2 \text{ кгм}^2 \text{ будет равен } 0,6 \text{ кгм}^2; \text{ при}$$

$$M_H - M_c = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t}; \quad \Delta t = 0,00194 \text{ с;}$$

$$460,2 - 76,7 = \frac{0,6 \Delta\omega}{0,00194}; \quad 383,5 = 309,28 \Delta\omega;$$

$\Delta\omega = 1,24 \text{ рад/с,}$ что соответствует

$$n = \frac{30 \cdot 1,24}{3,14} = 11,85 \text{ об/мин.}$$

При этом, как показано в [1], критическое скольжение двигателя естественное и с добавочной индуктивностью:

$$s_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_k^2}}; \quad s'_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + (X_k + X_{д})^2}}.$$

Здесь R'_2 – приведенное сопротивление ротора;

$$R_{\Sigma} = R_k + R_{кат} = 1,1 + 0,174 = 1,274 \text{ Ом.}$$

Отношение скольжений:

$$\frac{s'_{кр}}{s_{кр}} = \frac{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_k^2}}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + (X_k + X_{д})^2}}.$$

Аналогично для критических моментов:

$$M_{кр} = K \frac{U^2}{R_{\Sigma} + \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_k^2}};$$

$$M'_{кр} = K \frac{U^2}{R_{\Sigma} + \sqrt{R_{\Sigma}^2 + (X_k + X_{д})^2}},$$

где K – постоянный коэффициент.

Отношение моментов

$$\frac{M'_{кр}}{M_{кр}} = \frac{R_{\Sigma} + \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_k^2}}{R_{\Sigma} + \sqrt{R_{\Sigma}^2 + (X_k + X_{д})^2}},$$

следовательно,

$$\frac{s'_{кр}}{s_{кр}} = \frac{\sqrt{1,247^2 + 1,29^2}}{\sqrt{1,247^2 + 3,21^2}} = \frac{1,813}{3,45} = 0,5255;$$

$$\frac{M'_{кр}}{M_{кр}} = \frac{1,274 + 1,813}{1,274 + 3,45} = 0,6535.$$

Таким образом, критическое скольжение $s'_{кр}$ при введении индуктивности в цепь статора уменьшилось в 2 раза, а критический момент $M'_{кр}$ уменьшился примерно на 35%. Это положительно влияет на динамику электропривода из-за увеличения «жесткости» механической характеристики в рабочей области, но относительно сужает эту область. Особенно, если учесть, что значение пускового момента также уменьшится и будет составлять $(1/2)^2 = 1/4$ его естественного значения.

Во всех случаях необходима предварительная проверка значения пониженного пускового момента двигателя M_{II} , который должен быть больше момента трогания приводимого механизма.

Вывод. Предлагаемый способ ограничения бросков тока в статорной цепи асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, работающих в электроприводах с тяжелыми условиями пуска и резкопеременной нагрузкой, отличается простотой, надежностью, эффективностью и малыми затратами по сравнению с существующими способами [7–10]. Появляется возможность увеличения безремонтного срока службы двигателя, элементов рабочего механизма и питающей электрической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гейлер Л.Б. Основы электропривода. Минск: Высшая школа, 1972, 608 с.

2. **Фираго Б.И., Павлячик Л.Б.** Регулируемые электроприводы переменного тока. М.: Техноперспектива, 2006, 363 с.
3. **Дьяков В.И.** Типовые расчеты по электрооборудованию. М.: Высшая школа, 1991, 160 с.
4. **Чиликин М.Г., Сандлер А.С.** Общий курс электропривода, М.: Энергоиздат, 1981, 576 с.
5. **Павлюк К., Беднарек С.** Пуск и синхронные режимы синхронных двигателей. М.: Энергия, 1971, 271 с.
6. **Pat. РФ № 2253179.** Способ ограничения пускового тока асинхронного двигателя/С.Н. Сидоров, М.А. Боровиков, П.В. Кудряшов, 2005.
7. **Ванурин В.Н., Пономаренко К.Б., Креймер А.С.** Снижения пускового тока асинхронных двигателей изменением параметров статорной обмотки. – Научный журнал КубГАУ, 2013, № 87, с. 1–14.
8. **Электротехнический справочник.** Т. 3., книга вторая/Под общей ред. В.Г. Герасимова и др. М.: Энергоатомиздат, 1988, 616 с.

9. **Трещёв И.И.** Электромеханические процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980, 344 с.
10. **Казовский Е.Я.** Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962, 624 с.

[09.09.2019]

А в т о р ы: Шамсиев Муким Вахобович – кандидат техн. наук, доцент филиала НИУ «МЭИ» (Душанбе, Республика Таджикистан).

Абдулкеримов Сагит Абдурахманович – кандидат техн. наук, директор филиала НИУ «МЭИ» (Душанбе, Республика Таджикистан).

Шамсиев Абдувахоб Мукимович – инженер-электрик ЗАО «Фароз» (Душанбе, Республика Таджикистан).

Electrichestvo, 2020, No. 2, pp. 22–26

DOI:10.24160/0013-5380-2020-2-22-26

Limitation of Inrush Currents in Electric Drives Containing Induction Motors with a Squirrel-Cage Rotor

SHAMSIYEV Mukim V. (A Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU «MPEI»), Dushanbe, Republic of Tadjikistan) – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor

ABDULKERIMOV Sagit A. (A Branch of NRU «MPEI», Dushanbe, Republic of Tadjikistan) – Cand. Sci. (Eng.), Director

SHAMSIYEV Abduvakhob M. (Closed Joint-Stock Company «Farož», Dushanbe, Republic of Tadjikistan) – Engineer-electrician

The article proposes a method for limiting inrush currents in electric drives operating under heavy startup conditions and with an abruptly variable load that contain induction motors with a squirrel cage rotor. According to the proposed method, an inductance is connected in the motor stator circuit through an uncontrolled rectifier. During the startup, the motor must develop an increased torque necessary, first, to overcome the resistance torque of the speeded up machine and, second, for imparting kinetic energy to the inertial masses. In view of this, the motor consumes large amount of energy, which is manifested in an increased startup current taken from the network and in increased heating of motor windings. A procedure for calculating the main inductance parameters and transients is presented. The advantages and the application field of the method are analyzed.

Key words: electric drive, induction motor, squirrel-cage rotor, inductance

REFERENCES

1. **Geiler L.B.** *Osnovy elektropriroda* (Drive Basics). Minsk, Vysshaya shkola, 1972, 608 p.
2. **Figaro B.I., Pavlyachik L.B.** *Reguliruyemye elektroprirody peremennogo toka* (Adjustable AC Drives). Moscow, Tekhnoperspektiva, 2006, 363 p.
3. **D'yakov V.I.** *Tipovye raschety po elektrooborudovaniyu* (Typical calculations for electrical equipment). Moscow, Vysshaya shkola, 1991, 160 p.
4. **Chilikin M.G., Sandler A.S.** *Obshchii kurs elektropriroda* (General course of electric drive). Moscow, Energoizdat, 1981, 576 p.
5. **Pavlyuk K., Bednarek S.** *Pusk i sinkhronnyye rezhimy sinkhronnykh dvigateley* (Start-up and synchronous modes of synchronous motors). Moscow, Energiya, 1971, 271 p.
6. **Pat. RF No. 2253179.** *Sposob ogranicheniya puskovogo toka asinkhronnogo dvigatelya* (The method of limiting the starting current

of an induction motor)/S.N. Sidorov, M.A. Borovikov, P.V. Kudryashov, 2005.

7. **Vanurin V.N., Ponomarenko K.B., Kreimer A.S.** *Nauchnyi zhurnal KubGAU – in Russ. (Scientific magazine of Cuban' State Aviation University)*, 2013, No. 87, pp. 1–14.

8. **Elektrotekhnicheskii spravochnik. Tom. 3, kniga 2/ Pod red. V.G. Gerasimova i dr.** (Electrical reference. Vol. 3, Book 2/Edit. by V.G. Gerasimov et al.). Moscow, Energoatomizdat, 1988, 616 p.

9. **Treshchov I.I.** *Elektromekhanicheskiye protsessy v mashinakh peremennogo toka* (Electromechanical processes in AC machines). Leningrad, Energiya, 1980, 344 p.

10. **Kazovskiy Ye.Ya.** *Perekhodnyye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka* (Transients in electrical AC machines). Moscow, Publ. of USSR Academy of Sciences, 1962, 624 p.

[09.09.2019]