

УДК 621.313.333

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПУСКА АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. С. Петрушин, А. М. Якимец, В. В. Ермолаев

Одесский национальный политехнический университет
просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина. E-mail: victor_petrushin@ukr.net

Рассмотрены прямой пуск асинхронного короткозамкнутого двигателя, а также пуски с помощью тиристорного преобразователя напряжения и транзисторного преобразователя частоты. Учтена специфика работы двигателя в приводах с полупроводниковыми преобразователями, заключающаяся в несинусоидальности питающего напряжения и изменениях параметров схем замещения, связанных с изменением параметров питающего напряжения, а также насыщением магнитной цепи и вытеснением тока в обмотке ротора. По результатам расчетов потребленной энергии показано преимущество частотного пуска. Экспериментально подтверждена корректность предлагаемых математических моделей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, переходные процессы, прямой и плавный пуски, энергетические показатели пуска.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПУСКУ АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНЕНОГО ДВИГУНА

В. С. Петрушин, А. М. Якімець, В. В. Єрмолаєв

Одеський національний політехнічний університет
просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна. E-mail: victor_petrushin@ukr.net

Розглянуто прямий пуск асинхронного двигуна, а також пуски за допомогою тиристорного перетворювача напруги та транзисторного перетворювача частоти. Враховано специфіку роботи двигуна в приводах із напівпровідниковими перетворювачами, що полягає у несинусоїдальності напруги живлення й зміні параметрів заступних схем, пов'язаних зі зміною параметрів напруги живлення, а також насиченням магнітного кола та витісненням струму в обмотці ротора. За результатами розрахунків спожитої енергії показано перевагу частотного пуску. Експериментально підтверджено коректність запропонованих математичних моделей.

Ключові слова: асинхронний двигун, перехідні процеси, прямий та плавний пуски, енергетичні показники пуску.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Вопросам пуска асинхронного двигателя (АД) посвящены многие работы. В большинстве из них исследуются электромагнитные, электромеханические характеристики [1–4]. В ряде работ анализируются также энергетические и тепловые показатели пуска [5–7].

Возможность осуществления плавного пуска с помощью различных полупроводниковых преобразователей предопределяет целесообразность сопоставления вышеупомянутых характеристик и показателей прямого и плавных пусков. Наиболее распространенными устройствами, обеспечивающими плавный пуск, являются тиристорные преобразователи напряжения (ТПН), т.н. устройства «мягкого» пуска и транзисторные преобразователи частоты (ТПЧ).

Математические модели (ММ), описывающие динамические режимы, должны учитывать специфику работы двигателя в приводах с полупроводниковыми преобразователями, заключающуюся в несинусоидальности питающего напряжения и изменениях параметров схем замещения, связанных с изменением параметров питающего напряжения, а также насыщением магнитной цепи и вытеснением тока в обмотке ротора. При анализе работы АД в динамических режимах может быть использован значительный опыт по исследованию переходных процессов в асинхронных машинах [8].

Каждая высшая временная гармоническая (ВВГ) питающего двигателя напряжения создает ряд высших пространственных гармонических (ВПГ). Существует ряд статей, в которых рассматривается учет ВВГ при анализе установившихся и динамических режимов

регулируемых асинхронных двигателей (РАД) [9–11]. При учете совокупного влияния высших пространственно-временных гармоник (ВПВГ) обеспечивается корректировка механических характеристик РАД [12], уточнение энергетических и тепловых показателей в установившихся режимах работы [13].

Учет совокупного влияния ВПВГ на характеристики РАД в переходных режимах возможно осуществить, используя подход, изложенный в [8, 14]. Согласно ему, РАД в системе преобразованных координат может быть описан системой уравнений, составленных для каждого условного двигателя, питаемого напряжением соответствующей ВПВГ, совокупностью которых заменяется реальный двигатель для каждой учитываемой ВПВГ. Например, если принимаются во внимание пространственные и временные гармоники порядков 1, 5, 7, 11, 13, то уравнений в системе будет 125. В матричном виде уравнения асинхронной машины представляются так:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha v}(t) &= \mathbf{u}_{s\alpha v}(t) - \mathbf{r}_{sv} \times \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\times [(\mathbf{x}_{rv}(t) \times \Psi_{s\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \Psi_{r\alpha v}(t))] \\ \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta v}(t) &= \mathbf{u}_{s\beta v}(t) - \mathbf{r}_{sv} \times \mathbf{d}_v(t) \times \\ &\times [(\mathbf{x}_{rv}(t) \Psi_{s\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \Psi_{r\beta v}(t))] \\ \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha v}(t) &= -p\omega_r \times \Psi_{r\beta v}(t) - \mathbf{r}_{rv}(t) \times \\ &\times \mathbf{d}_v(t) \times [(\mathbf{x}_{sv}(t) \times \Psi_{r\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \Psi_{s\alpha v}(t))] \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{r\beta v}(t) = p\omega_r \times \Psi_{r\alpha v}(t) - \mathbf{r}_{rv}(t) \times \mathbf{d}_v(t) \times [(\mathbf{x}_{sv}(t) \times \Psi_{r\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \Psi_{s\beta v}(t))] \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \left\{ \frac{3p}{2} [\mathbf{x}_{Mv}(t) \times \mathbf{d}_v(t) \times \Psi_{s\beta v}(t) \times \Psi_{r\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \mathbf{d}_v(t) \times \Psi_{s\alpha v}(t) \times \Psi_{r\beta v}(t)] - M_c(\omega_r) \right\},$$

где включаемые матрицы являются двумерными. $\Psi_{sav}(t)$, $\Psi_{s\beta v}(t)$, $\Psi_{rav}(t)$, и $\Psi_{r\beta v}(t)$ – матрицы потокосцеплений статорных и роторных обмоток машины, соответственно по осям α и β ; ω_r – угловая частота вращения вала; p – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя; $M_c(\omega_r)$ – зависимость момента сопротивления механизма от частоты вращения; \mathbf{r}_{sv} , $\mathbf{r}_{rv}(t)$, $\mathbf{x}_{sv}(t)$, $\mathbf{x}_{rv}(t)$, $\mathbf{x}_{Mv}(t)$ – матрицы активных и реактивных сопротивлений обмоток статора и ротора и сопротивлений взаимоиנדукции, причем все они, за исключением \mathbf{r}_{sv} , изменяются на каждом шаге интегрирования; $\mathbf{d}_v(t)$ – матрицы вспомогательных переменных $\mathbf{d}_v(t) = [\mathbf{x}_{sv}(t)\mathbf{x}_{rv}(t) - (\mathbf{x}_{Mv}(t))^2]^{-1}$; $\mathbf{u}_{sav}(t)$ и $\mathbf{u}_{s\beta v}(t)$ – матрицы мгновенных значений напряжений по осям α и β , которые определяются амплитудами напряжений \mathbf{U}_{mv} , (зависящих от закона частотного управления) и угловых положений обобщенных векторов напряжений Φ_{1v} :

$$\mathbf{u}_{sa v}(t) = \mathbf{U}_{mv}(t) \cos(\Phi_{1v}); \\ \mathbf{u}_{s\beta v}(t) = \mathbf{U}_{mv}(t) \sin(\Phi_{1v}).$$

В случае частотного пуска система дополняется еще двумя дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d}{dt} \Phi_{1v} = \omega_{1v} \quad \dot{\omega}_{1v} = \boldsymbol{\varepsilon}_{1v}(t),$$

где ω_{1v} – матрицы угловых частот вращения, а $\boldsymbol{\varepsilon}_{1v}(t)$ – матрицы угловых ускорений обобщенных векторов напряжений, определяемых задаваемой тахограммой движения привода.

Выражения, связывающие матрицы мгновенных значений токов и потокосцеплений, имеют следующий вид:

$$\mathbf{i}_{sav}(t) = \mathbf{d}_v(t) [\mathbf{x}_{rv}(t)\Psi_{sav}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t)\Psi_{rav}(t)]; \\ \mathbf{i}_{s\beta v}(t) = \mathbf{d}_v(t) [\mathbf{x}_{rv}(t)\Psi_{s\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t)\Psi_{r\beta v}(t)],$$

где \mathbf{i}_{sav} , $\mathbf{i}_{s\beta v}$ – матрицы токов статора по осям α и β . Действующее значение тока статора

$$\mathbf{i}_{1v}(t) = \sqrt{\frac{1}{2} [\mathbf{i}_{sav}(t)^2 + \mathbf{i}_{s\beta v}(t)^2]}.$$

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры условных двигателей для основной гармоники и ВПВГ, изменяющиеся в каждой рабочей точке вследствие явлений насыщения магнитной системы и вытеснения тока в обмотке ротора. Предлагаемый подход к анализу динамических характеристик АД предполагает предварительное определение этих коэффициентов для необходимых рабочих точек

диапазона регулирования. Поэтому до анализа переходного процесса проводятся расчеты установившихся режимов с целью получения значений всех параметров схем замещения основной гармоники и ВПВГ с учетом вытеснения токов в обмотке ротора и насыщения магнитопровода для необходимых рабочих точек диапазона регулирования. Для этого используются ММ установившихся режимов.

Потребляемая двигателем условная активная мощность в динамических режимах рассчитывается через матрицы напряжений и токов, учитывающие u гармонических составляющих:

$$P'_1 = \frac{3}{2} [U_{s\alpha\alpha} I_{s\alpha\alpha} + U_{s\beta\beta} I_{s\beta\beta}].$$

Реальная потребляемая активная мощность P_1 больше условной на величину суммы неучтенных потерь (в магнитопроводе, добавочных, механических):

$$P_1 = P'_1 + \Delta P_{ct\text{ осн}} + \Delta P_{ct\text{ дооб}} + \Delta P_{mex} + \Delta P_{дооб}.$$

Мощность на валу двигателя может быть определена через матрицы потокосцеплений и токов с использованием значения частоты вращения ротора:

$$P_2 = \omega_r \frac{3p}{2} [\mathbf{I}_{r\beta v} \Psi_{rav} - \mathbf{I}_{rav} \Psi_{r\beta v}] - \Delta P_{mex} - \Delta P_{дооб}.$$

Мгновенное значение КПД определяется отношением мгновенных значений полезной мощности на валу двигателя $P_2(t)$ к потребляемой мгновенной мощности $P_1(t)$.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования прямого пуска АД, а также плавных пусков с определенной интенсивностью изменения параметра регулирования (угла открытия тиристоров ТПН α или, соответственно, напряжения на двигателе; для ТПЧ – частоты напряжения питания АД и, в соответствии с законом частотного управления, величины напряжения питания АД). Двигатель 4АХ80А6У3 в разных опытах питался либо непосредственно от сети, либо от ТПН типа “Климатика”, либо от ТПЧ типа АЛТИВАР-28. Линейное напряжение сети во время эксперимента составляло 380 В. Действующие значения токов измерялись с помощью цифрового осциллографа. Момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом составлял 0,1 кг·м². Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от числа оборотов, что описывалась следующим уравнением: $M(n) = 0,3 + 0,003n$. Исследования были проведены при интенсивности нарастания угла открытия тиристоров ТПН 35 град/с, что примерно соответствует интенсивности нарастания напряжения на двигателе 54 В/с, и при интенсивности нарастания частоты ТПЧ 14 Гц/с и для закона частотного управления $U/f = \text{const}$. Интенсивности подобраны таким образом, чтобы время плавного пуска было одинаково при пуске с помощью ТПН и ТПЧ.

Рассматриваемые математические модели легли в основу расчетной программы [15], с помощью которой были выполнены теоретические исследования. На рис. 1 представлены результаты

теоретических (сплошной линией) и экспериментальных (пунктиром) исследований – тока, потребляемого двигателем, и расчетного электромагнитного момента при его пуске.

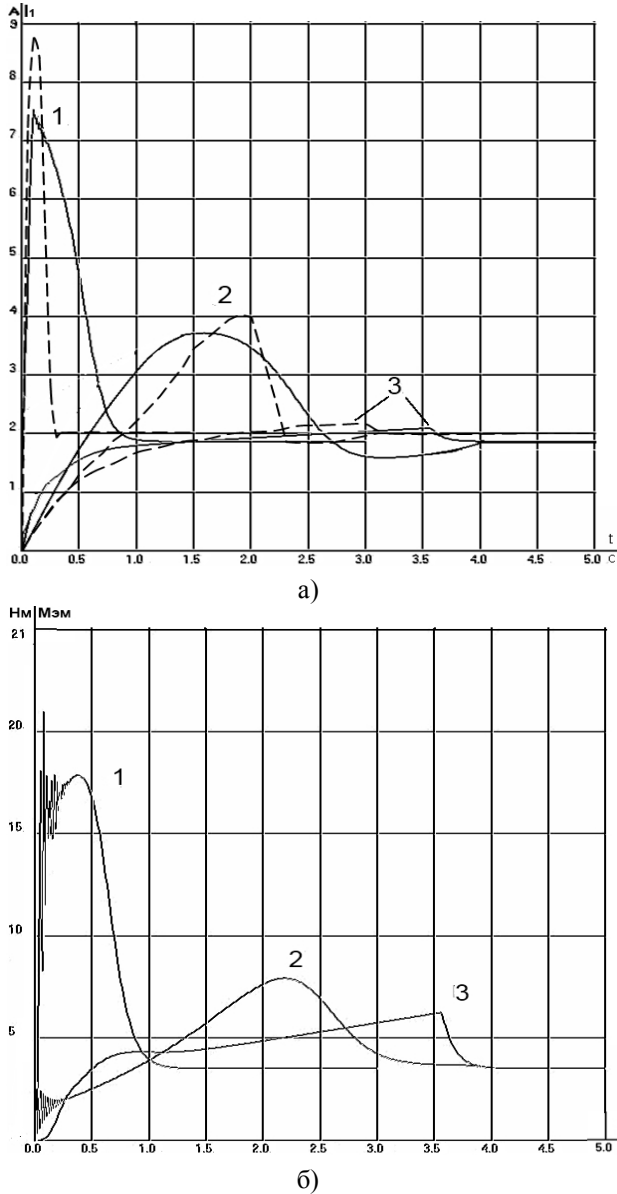


Рисунок 1 – Ток, потребляемый двигателем (а) и расчетный электромагнитный момент (б) двигателя при различных способах пуска:
1 – прямой пуск; 2 – плавный пуск с помощью ТПН; 3 – плавный пуск с помощью ТПЧ

На рис. 2 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований – КПД и потребляемой мощности двигателя при пуске.

Полученные зависимости потребляемой мощности и КПД позволяют рассчитать значения потерь электрической энергии, затраченной за время пуска. Результаты расчетов потерь, определенных на основании моделирования, представлены в табл. 1.

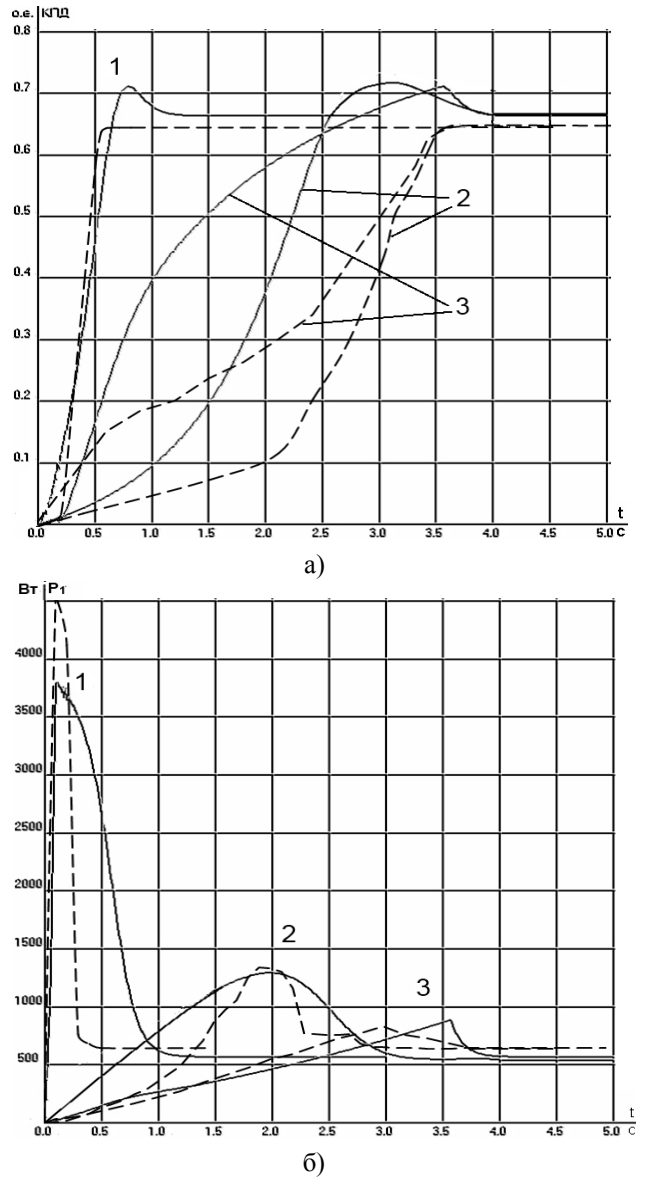


Рисунок 2 – Изменения КПД (а) и потребляемой мощности (б) двигателя при пуске:
1 – прямой пуск; 2 – плавный пуск с помощью ТПН; 3 – плавный пуск с помощью ТПЧ

Таблица 1 – Энергетические показатели различных способов пуска

Показатели	Способ пуска АД		
	прямой	с пом. ТПН	с пом. ТПЧ
Среднее значение потребляемой двигателем мощности, Вт	1605	985	521
Среднее значение КПД двигателя, о.е.	0,422	0,263	0,424
Потери электрической энергии, Вт·с	928	725	300

ВЫВОДЫ. 1. Характеристики, полученные в ходе эксперимента и расчетные характеристики идентичны.

2. Броски токов существенно снижаются при плавных пусках: при пуске с помощью ТПН кратность пускового тока составляет 2,05, при пуске с помощью ТПЧ – 1,22 против 4,16 при прямом пуске.

3. Значения бросков пусковых моментов уменьшаются при плавных пусках следующим образом: при пуске с помощью ТПН кратность пускового момента составляет 2,42, при пуске с помощью ТПЧ – 1,88 против 5,45 при прямом пуске.

4. Зависимости потребляемой двигателем при пуске мощности определяются зависимостями электромагнитного момента.

5. Для проведенных исследований наименее энергоэффективным является пуск с помощью ТПН.

6. Аналогичным образом исследуемые показатели могут быть рассчитаны при других условиях пуска (различные нагрузки на валу, моменты инерции, интенсивности нарастания параметра регулирования и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Л.П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 184 с.

2. Браславский И.Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.

3. Анализ переходных процессов при пуске асинхронного короткозамкнутого двигателя. Стадия трогания (вторая стадия разгона) // Электротехника. – 2010. – № 2. – С. 31–35.

4. Анализ переходных процессов при пуске асинхронного короткозамкнутого двигателя. Стадия трогания // Электротехника. – 2010. – № 8. – С. 24–28.

5. Петров Л.П., Андрющенко О.А., Капинос В.И. и др. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 200 с.

6. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1998. – 172 с.

7. Петрушин В.С., Якимец А.М. Исследование энергетических показателей асинхронных двигателей в динамических режимах при параметрическом

управлении // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 5. – С. 50–52.

8. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.

9. Глухивский Л.И., Биляковский И.Е. Расчет установившегося режима АД при его несинусоидальном питании // Техн. электродин. – 1988. – № 5. – С. 57–60.

10. Петрушин В.С. Влияние высших гармонических напряжения на характеристики асинхронного двигателя в электроприводе с фазовым управлением // Труды Одесского политехнического университета. – 1997. – Вып. 1. – С. 214–218.

11. Петрушин В.С., Якимец А.М. Исследование энергетических показателей асинхронных двигателей в динамических режимах при параметрическом управлении // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 5. – С. 50–52.

12. Петрушин В.С., Якимец А.М., Петрушина З.В. Корректировка расчета механических характеристик асинхронных двигателей при фазовом управлении // Всеукр. наук.-техн. конф. “Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів. – ПАЕТЗ–2005”. – Миколаїв: – 2005. – Т. 2. – С. 164–169.

13. Петрушин В.С., Якимец А.М., Груша А.В., Каленик О.В. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно-временных гармоник // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід.наук.-техн. зб. – 2008. – Вип. 70. – С. 68–71.

14. Петрушин В.С. Учебное пособие “Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе” // Наука и техника. – Одесса, 2006. – 320 с.

15. Петрушин В.С., Рябинин С.В., Якимец А.М. Программный продукт „DIMASDrive”. Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065). – К.: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT WAYS OF STARTING OF CAGE INDUCTION MOTOR

V. Petrushin, A. Yakimets, V. Yermolayev,

Odessa National Polytechnical University

prosp. Shevchenko, 1, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: victor_petrushin@ukr.net

Considered direct starting of cage induction motor, and also starting by means of thyristor voltage converter and transistor frequency converter. The specifics of the engine drives with semiconductor converters, consisting in nonsine supply voltage and changes the parameters of equivalent circuits associated with a change in the parameters of the supply voltage, and saturation of magnetic circuit and the displacement current in the rotor winding are taking into account. According to the results of calculations of energy consumed shows the advantage of frequency start. Correctness of the offered mathematical models is experimentally confirmed.

Key words: induction motor, transients, direct and smooth starting, power indexes of starting.

REFERENCES

1. Petrov L.P. *Management of the start and braking of the asynchronous engines*. – M.:Energoatomizdat, 1982. – 184 p. [in Russian]
2. Braslavskiy I.Y. *Asynchronous semiconductor electric drive with the parametrical control*. – M.: Energoatomizdat, 1988. – 224 p. [in Russian]
3. Analysis of the transitive processes during the start of the asynchronous short-circuited engine. Drive off phase (second phase of the acceleration) // *Electrotechnics*. – 2010. – № 2. – PP. 31–35. [in Russian]
4. Analysis of the transitive processes during the start of the asynchronous short-circuited engine. Drive off phase. // *Electrotechnics*. – 2010. – № 8. – PP. 24–28. [in Russian]
5. Petrov L.P., Andrushenko O.A., Kapinos V.I. *Thyristor voltage converters for asynchronous electric drive*. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 200 p. [in Russian]
6. Pozdeev A.D. *Electromagnetic and electromechanical processes in the frequency-regulated asynchronous electric drives*. – Cheboksary: Publ. Chuvash, Univ. – 172 p. [in Russian]
7. Petrushin V.S., Yakimets A.M. *Research of the energetic factors of the asynchronous engines in dynamic modes with parameterized control* // *Technical electrodynamics*. – 2001. – № 5. – PP. 50–52. [in Russian]
8. Kopylov I.P. *Mathematical modeling of electrical machines*. – M.: Vishshaya shkola, 1987. – 248 p. [in Russian]
9. Gluhivskiy L.I., Bilyakovskiy I.Y., The calculation of steady-state IM when sine not wave power // *Technical electrodynamics*. – 1988. – № 5. – PP. 57–60. [in Russian]
10. Petrushin V.S. The influence of higher harmonic voltage-tion on the characteristics AD in the electric drive with phase control-it. // *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*. – 1997. – Iss. 1. – PP. 214–218. [in Russian]
11. Petrushin V.S., Yakimets A.M. The study of energy performance of induction motors under dynamic conditions in parametric control // *Technical electrodynamics*. – 2001. – № 5. – PP. 50–52. [in Russian]
12. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Petrushina Z.V. Adjustment of the calculation of the mechanical characteristics of induction motors with phase control // *Allukrainian scientific and technical conference "Problems of automation and electric transport vehicles. – PAETV-2005"*. – Nikolaev. – 2005. – T. 2. – PP. 164–169. [in Russian]
13. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Grusha A.V., Kalenyk O.V. Energetic and thermal performance of controlled asynchronous motors, taking into account the higher harmonics of the space-time // *Electrical engineering*. – 2008. – Iss. 70. – PP. 68–71. [in Russian]
14. Petrushin V.S. Tutorial "Asynchronous nye-controlled electric motors in the" // *Science and Technology*, – Odessa, 2006. – 320 p. [in Russian]
15. Petrushin V.S., Ryabinin S.V., Yakimets A.M. *Software product „DIMASDrive”. Program for the analysis, choice and design of the asynchronous short-circuited engines (program registration certificate PAN№4065)*. – K.: Department of the education and science of Ukraine. State department of the intellectual property, 26.03.2001. [in Russian]

Стаття надійшла 9.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.