

В.С. Петрушин¹, докт.техн.наук, А.М. Якимец^{1*}, канд.техн.наук, Ю.Р. Плоткин², канд.техн.наук, Р.Н. Еноктаев¹

¹Одесский национальный политехнический университет,
пр-т Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина,

²Берлинская высшая школа экономики и права,
Альт Фридрихсфельде, 60, Берлин, 10315, Германия,
e-mail: viktor_petrushin@ukr.net, yakimets_andriv@ukr.net,
juriy.plotkin@hwr-berlin.de, rostik-enok@inbox.ru

Приведены результаты теоретического анализа и экспериментального исследования пуска асинхронного двигателя АИР71А2УЗ при использовании устройства плавного пуска АТS 01N21QN. Рассмотрены два режима работы устройства, обеспечивающие разную продолжительность пуска. При математическом моделировании учитывается несинусоидальность питающего двигателя напряжения и наличие пространственных гармонических магнитного поля двигателя. Параметры схемы замещения, используемые в качестве нелинейных коэффициентов в системе дифференциальных уравнений, рассчитываются с учетом насыщения магнитной цепи и вытеснения тока в обмотке ротора. Библ. 11, рис. 5.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, устройство плавного пуска, параметрическое фазовое управление, продолжительность пуска, экспериментальные исследования, математическое моделирование пуска.

Введение. Устройство плавного пуска АТS 01N21QN позволяет осуществлять управляемые пускотормозные и реверсивные режимы [1,4], реализуя параметрическое фазовое управление асинхронным двигателем (АД). Электроприводы с таким управлением имеют низкую стоимость и высокую надежность. Математические модели (ММ), описывающие динамические режимы, должны учитывать специфику работы двигателя в приводах с параметрическим фазовым управлением, заключающуюся в несинусоидальности питающих напряжений и изменениях параметров схем замещения, связанных с 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 [8-11].

Каждая высшая временная гармоническая (ВВГ) питающего двигателя напряжения создает ряд высших пространственных гармонических (ВПГ). В некоторых работах рассматривается учет ВВГ при анализе установившихся и динамических режимов регулируемых асинхронных двигателей (РАД) [2,6]. При учете совокупного влияния высших пространственно-временных гармоник (ВПВГ) обеспечивается корректировка механических характеристик РАД, уточнение энергетических и тепловых показателей в установившихся режимах работы [8].

Цель работы. Апробация математической модели плавного пуска асинхронного двигателя с помощью полупроводникового преобразователя напряжения, позволяющей учитывать на каждом шаге интегрирования системы дифференциальных уравнений изменения основной и высших временных гармоник напряжения питания двигателя, а также порождаемых ими высших пространственных гармонических составляющих, параметров эквивалентных схем замещения условных двигателей каждой учитываемой гармоники, потерь в стали, добавочных и механических.

Постановка задач исследования. Учет совокупного влияния ВПВГ на характеристики при пуске возможно осуществить, используя подход, изложенный в [3,5,6]. Согласно ему АД в системе преобразованных координат может быть описан системой дифференциальных уравнений, составленных для каждого условного двигателя, питаемого напряжением соответствующей ВПВГ, совокупностью которых заменяется реальный двигатель, т.е. для каждой учитываемой ВПВГ. В матричном виде уравнения представляются так:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Psi_{sav}(t) &= \mathbf{u}_{sav}(t) - \mathbf{r}_{sv} \times \mathbf{d}_v(t) \times [(\mathbf{x}_{rv}(t) \times \Psi_{sav}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \times \Psi_{rav}(t))], \\ \frac{d}{dt} \Psi_{sbv}(t) &= \mathbf{u}_{sbv}(t) - \mathbf{r}_{sv} \times \mathbf{d}_v(t) \times [(\mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \Psi_{sbv}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \Psi_{rbv}(t))], \end{aligned} \quad (1)$$

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

где включаемые матрицы являются двумерными, $\Psi_{s\alpha v}(t)$, $\Psi_{s\beta v}(t)$, $\Psi_{r\alpha v}(t)$, и $\Psi_{r\beta v}(t)$ – матрицы потоко- сцеплений 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; $\mathbf{d}_v(t)$ – матрицы вспомогательных переменных $\mathbf{d}_v(t) = [\mathbf{x}_{sv}(t) \cdot \mathbf{x}_{rv}(t) - (\mathbf{x}_{Mv}(t))^2]^{-1}$; $\mathbf{u}_{s\alpha v}(t)$ и $\mathbf{u}_{s\beta v}(t)$ – матрицы мгновенных значений напряжений по осям α и β , которые определяются амплитудами напряжений U_{mv} и угловых положений обобщенных векторов напряжений φ_{1v}

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{s\alpha v}(t) &= U_{mv}(t) \cdot \cos(\varphi_{1v}), \\ \mathbf{u}_{s\beta v}(t) &= U_{mv}(t) \cdot \sin(\varphi_{1v}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varphi_{1v} = \omega_{1v} \cdot t$ – угловые положения обобщенных векторов напряжений статора соответствующих гармоник, определяемые их угловыми частотами вращения ω_{1v} .

Выражения, связывающие матрицы мгновенных значений токов и потоко- сцеплений, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{i}_{s\alpha v}(t) &= \mathbf{d}_v(t) \cdot [\mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \Psi_{s\alpha v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \Psi_{r\alpha v}(t)], \\ \mathbf{i}_{s\beta v}(t) &= \mathbf{d}_v(t) \cdot [\mathbf{x}_{rv}(t) \cdot \Psi_{s\beta v}(t) - \mathbf{x}_{Mv}(t) \cdot \Psi_{r\beta v}(t)], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{i}_{s\alpha v}$, $\mathbf{i}_{s\beta v}$ – матрицы токов статора по двум осям α и β .

Значение тока статора

$$\mathbf{i}_{1v}(t) = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [\mathbf{i}_{s\alpha v}(t)^2 + \mathbf{i}_{s\beta v}(t)^2]}. \quad (4)$$

В каждом из уравнений имеют место нелинейные коэффициенты – параметры условных двигателей основной гармоники и ВПВГ, изменяющиеся в каждой рабочей точке вследствие явления 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 [5].

Материалы и результаты исследований. Были проведены теоретические и экспериментальные исследования пуска АД мощностью 750 Вт с определенной интенсивностью изменения напряжения на двигателе. Двигатель АИР71А2У3 питался от устройства плавного пуска АТS 01N21QN. Входное сетевое линейное напряжение во время эксперимента составляло 380 В. Мгновенные значения токов и напряжений фиксировались с помощью цифрового многоканального осциллографа. На рис. 1, а показан фрагмент осциллограммы фазного напряжения АД при замедленном пуске (на 0,8 с) на холостом ходу. Используя осциллограмму, было определено изменение основной гармонической напряжения в зависимости от частот вращения, отвечающих различным точкам пуска, которое сравнивалось с аналогичным изменением, рассчитанным по аналитическим выражениям [4] при моделировании (рис. 1, б, где 1 – эксперимент, 2 – моделирование). По соответствующим аналитическим выражениям [4] определены также изменения напряжений всех рассматриваемых гармоник. Таким же образом обработаны осциллограммы для других пусковых режимов. Момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом составлял 0,0017 кг·м². Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от числа оборотов, которая описывалась следующим уравнением: $M(n) = 0,2 + 0,825 \cdot n \cdot 10^{-3}$. Ис-

следования были проведены для двух режимов пуска: ускоренного и замедленного (при интенсивностях нарастания напряжения на двигателе 114 и 44 В/с соответственно).

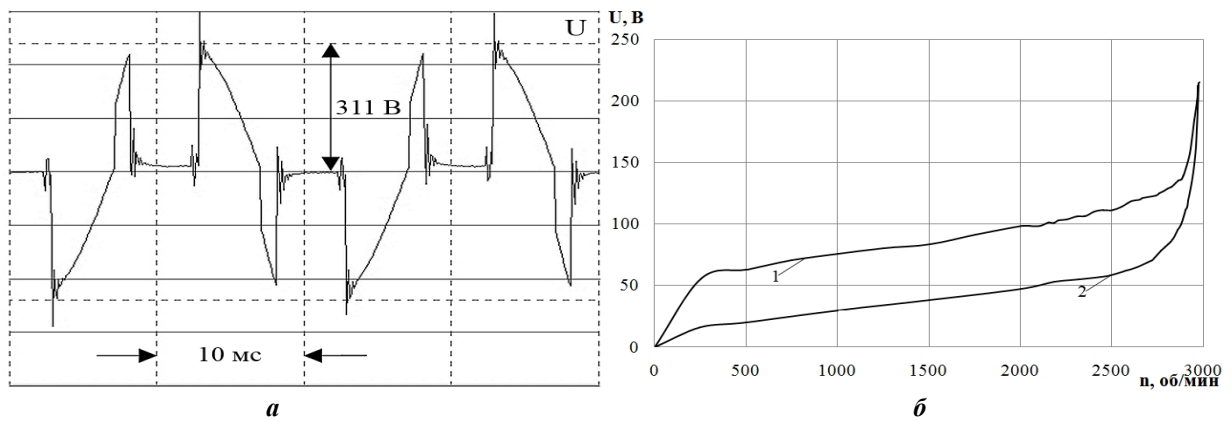


Рис. 1

Рассматриваемые математические модели легли в основу расчетной программы [7], с помощью которой были выполнены теоретические исследования нестационарных режимов двигателя, работающего при фазовом управлении. При данном исследовании принимались во внимание пространственные и временные гармоники порядков 1, 5, 7, 11, 13. Анализировались пуски при наличии и отсутствии (ХХ – холостой ход) нагрузки на валу двигателя. Нумерация характеристик соответствует следующему порядку: 1 – эксперимент (ХХ), 2 – эксперимент (нагрузка), 3 – моделирование (ХХ), 4 – моделирование (нагрузка).

На рис. 2, 3 показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований потребляемого двигателем тока и числа оборотов при ускоренном (а) и замедленном (б) пусках двигателя.

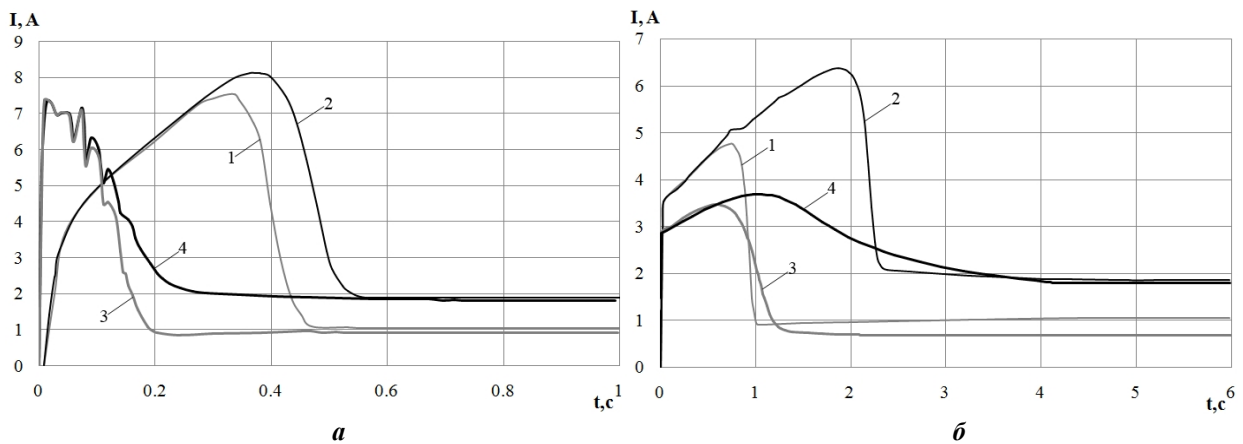


Рис. 2

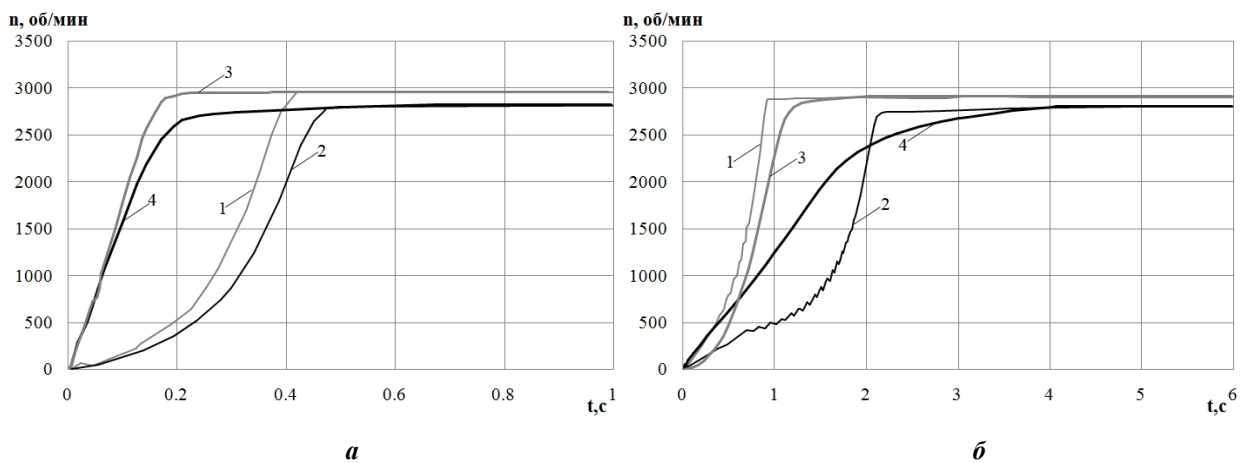


Рис. 3

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

$$P'_1 = \frac{3}{2} \cdot [U_{s\alpha\nu} \cdot I_{s\alpha\nu} + U_{s\beta\nu} \cdot I_{s\beta\nu}] \quad (5)$$

Реальная потребляемая активная мощность P_1 больше условной на величину суммы неучтенных потерь

$$P_1 = P'_1 + \Delta P_{ст\text{ осн}} + \Delta P_{ст\text{ дооб}} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{дооб} \quad (6)$$

где $\Delta P_{ст\text{ осн}}$, $\Delta P_{ст\text{ дооб}}$ – основные и добавочные потери в стали; $\Delta P_{мех}$, $\Delta P_{дооб}$ – механические и добавочные потери.

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

$$P_2 = \omega_r \frac{3p}{2} [I_{r\beta\nu} \Psi_{r\alpha\nu} - I_{r\alpha\nu} \Psi_{r\beta\nu}] - \Delta P_{мех} - \Delta P_{дооб} \quad (7)$$

Мгновенное значение КПД определяется отношением мгновенных значений полезной мощности на валу двигателя к потребляемой активной мощности P_1 .

Электрические потери в обмотках АД в динамических режимах

$$\Delta P_э = \Delta P_{э1} + \Delta P_{э2} = \frac{3}{2} \left((R_s I_{s\alpha\nu}) I_{s\alpha\nu} + (R_s I_{s\beta\nu}) I_{s\beta\nu} + (R_r I_{r\alpha\nu}) I_{r\alpha\nu} + (R_r I_{r\beta\nu}) I_{r\beta\nu} \right) \quad (8)$$

На рис. 4, 5 показаны результаты экспериментальных и теоретических исследований потребляемой двигателем мощности и КПД двигателя при ускоренном (а) и замедленном (б) пусках.

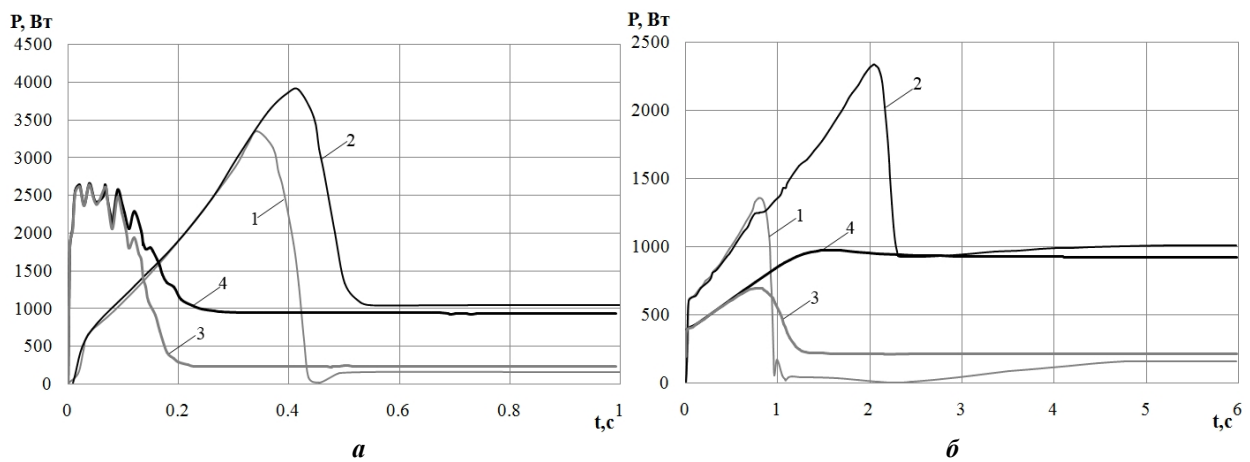


Рис. 4

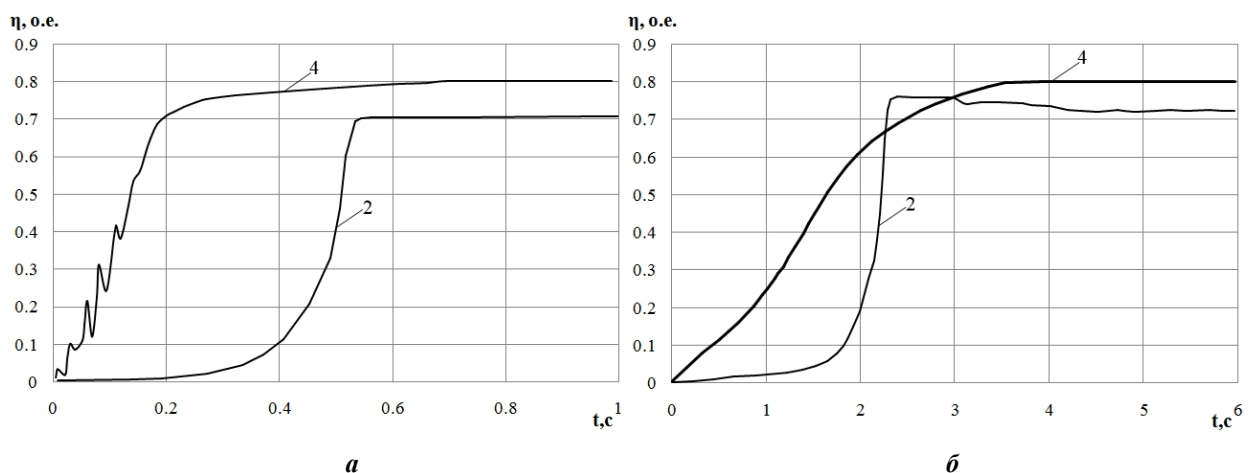


Рис. 5

Заключення. Теоретически и експериментально подтверждено, что с уменьшением интенсивности изменения параметра регулирования броски тока, потребляемого двигателем, снижаются, а продолжительность пуска увеличивается.

Существенное отличие величин напряжений, определенных по аналитическим выражениям и найденных в результате эксперимента для разных точек пуска, предопределяет различный вид теоретических и экспериментальных характеристик.

При замедленных пусках продолжительности пусков, полученные экспериментально и теоретически, близки, а значения токов, найденные в результате моделирования, меньше экспериментальных. При ускоренных пусках рассматриваемые продолжительности отличаются, а значения токов, наоборот, близки. Это наблюдается как при пуске на ХХ, так и при пуске на заданную нагрузку и связано с неточностью определения момента инерции, а также интенсивностью нарастания напряжения. Вследствие этого наблюдаются также различия между экспериментальными и теоретическими значениями потребляемых двигателем мощности и его КПД. По окончании пуска исследуемые показатели соответствуют значениям установившихся режимов.

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

1. *Браславский И.Я.* Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. М.: Энергоатомиздат, 1988. 224 с.
2. *Глухивский Л.И., Биляковский И.Е.* Расчет установившегося режима АД при его несинусоидальном питании. *Техн. электродинамика*. 1988. № 5. С. 57-60.
3. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1987. 248 с.
4. *Петров Л.П., Андриященко О.А., Капинос В.И., Подзолот Р.Г., Херунцев П.Э.* Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.
5. *Петрушин В.С.* Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. Одесса: Наука и техника, 2006. 320 с.
6. *Петрушин В.С., Еноктаев Р.Н., Шестаков О.И., Прокопенко Н.С.* Учет потерь от высших гармонических в регулируемых асинхронных двигателях. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. 2017. № 1. С. 101–105.
7. *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). Киев: Министерство образования и науки Украины. Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.
8. *Bhuvaneswari G., Charles S and Manjula G. Nair.* Power Quality Studies on a Soft Start for an Induction Motor. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, 2008*. Pp. 1–6.
9. *Eltamaly, A.I. Alolah and R.M. Hamouda.* Performance Evaluation of Three Phase Induction Motor under Different AC Voltage Control Strategies. *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, Bodrum, 2007*. Pp. 775–779.
10. *Hamed S.A., Chalmers B.J.* Analysis of variable voltage thyristor controlled induction motors. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*. 1990. Vol. 137. No 3. Pp. 184–193.
11. *Hiren Lakhani, Mr. Vinod Patel, J.G. Jamnani, Swapnil Jani.* Design and simulation of controller for medium voltage thyristorised induction motor soft starter. *International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS), Kuala Lumpur. 2009*. Pp. 1–5.

УДК 621.313.333.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАВНОГО ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

В.С. Петрушин¹, докт.техн.наук, **А.М. Якимец¹**, канд.техн.наук, **Ю.Р. Плоткін²**, канд.техн.наук, **Р.М.Єноктаєв¹**

¹Одеський національний політехнічний університет,

пр. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна,

²Берлінська вища школа економіки і права,

Альт Фридрихсфельде, 60, Берлін, 10315, Німеччина,

e-mail: viktor_petrushin@ukr.net, yakimets_andriy@ukr.net,

juriy.plotkin@hwr-berlin.de, rostik-enok@inbox.ru

Наведено результати теоретичного аналізу та експериментального дослідження пуску асинхронного двигуна АІР71А2УЗ при використанні пристрою плавного пуску АТS 01N21QН. Розглянуто два режими роботи пристрою, що забезпечують різну тривалість пуску. При математичному моделюванні враховується несинусоїда-

льність живлячої напруги двигуна і наявність просторових гармонійних магнітного поля двигуна. Параметри схеми заміщення, що використовуються як нелінійні коефіцієнти в системі диференціальних рівнянь, розраховуються з урахуванням насичення магнітного кола і витіснення струму в обмотці ротора. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: асинхронний двигун, пристрій плавного пуску, параметричне фазове керування, тривалість пуску, експериментальні дослідження, математичне моделювання пуску.

INVESTIGATION OF THE SMOOTH START-UP OF AN INDUCTION MOTOR

V.S. Petrushin¹, A.M. Yakimets¹, Y.R. Plotkin², R.N. Yenoktaev¹

¹Odessa National Polytechnic University,
Shevchenko av., 1, Odessa, 65044, Ukraine,

²Berlin School of Economics and Law,
Alt Friedrichsfelde, 60, Berlin, 10315, Germany,

e-mail: viktor_petrushin@ukr.net, yakimets_andriv@ukr.net,

juriy.plotkin@hwr-berlin.de, rostik-enok@inbox.ru

The results of theoretical analysis and experimental investigation of the start of the asynchronous motor ANP71A2U3 with the use of the soft start device ATS 01N21QN are presented. Two modes of operation of the device are considered, providing different start-up times. In mathematical modeling, the non-sinusoidal nature of the motor supply voltage and the presence of the spatial harmonic magnetic field of the motor are taken into account. The parameters of the substitution circuit used as nonlinear coefficients in the system of differential equations are calculated taking into account the saturation of the magnetic circuit and the displacement of the current in the rotor winding.

References 11, figures 5.

Key words: induction motor, soft starter, parametric phase control, start time, experimental studies, Mathematical simulation of start-up.

1. *Braslavskii I.Ia.* Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control. Moskva: Energoatomizdat, 1988. 224 p. (Rus)
2. *Glukhivskii L.I., Biliakovskii I.E.* Calculation of the steady state of the motor with its non-sinusoidal feeding. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika*. 1988. No 5. Pp. 57–60. (Rus)
3. *Kopylov I.P.* Mathematical modeling of electrical machines. Moskva: Vysshaya shkola, 1987. 248 p. (Rus)
4. *Petrov L.P., Andriushchenko O.A., Kapinos V.I., Podzolov R.G., Kheruntsev P.E.* Thyristor voltage converters for an asynchronous electric drive. Moskva: Energoatomizdat, 1986. 200 p. (Rus)
5. *Petrushin V.S.* Induction motors in the controlled-speed electric drives. Odessa: Nauka i Tekhnika, 2006. 320 p. (Rus)
6. *Petrushin V.S., Enoktaev R.N., Shestakov O.I., Prokopenko N.S.* Accounting for losses from higher harmonic in regulated asynchronous motors. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennia enerhii*. 2017. No 1. Pp. 101–105. (Rus)
7. *Petrushin V.S., Riabinin S.V., Yakimets A.M.* The software product "DIMASDrive". The program for analysis, selection and design of asynchronous squirrel cage motors in the variable speed electric drive systems (registration certificate program PA№4065). Kyiv: State Department of Intellectual Property of liability, 26.03.2001. (Rus)
8. *Bhuvaneshwari G., Charles S and Manjula G. Nair.* Power Quality Studies on a Soft Start for an Induction Motor. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, 2008*. Pp. 1–6.
9. *Eltamaly, A.I. Alolah and R.M. Hamouda.* Performance Evaluation of Three Phase Induction Motor under Different AC Voltage Control Strategies. *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, Bodrum, 2007*. Pp. 775–779.
10. *Hamed S.A., Chalmers B.J.* Analysis of variable voltage thyristor controlled induction motors. *IEE Proceedings B. Electric Power Applications*. 1990. Vol. 137. No 3. Pp. 184–193.
11. *Hiren Lakhani, Mr. Vinod Patel, J.G. Jamnani, Swapnil Jani.* Design and simulation of controller for medium voltage thyristorised induction motor soft starter. *International Conference for Technical Postgraduates (TECHPOS), Kuala Lumpur, 2009*. Pp. 1–5.

Надійшла 28.04.2017

Остаточний варіант 07.12.2017