

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЗАКОНЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ $E/f=\text{const}$

В. С. Петрушин, А. М. Якимец, Р. Н. Еноктаев, А. В. Бибик
Одесский национальный политехнический университет

Аннотация. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование частотного пуска асинхронного двигателя АИР71А2У3 при законе регулирования $E/f=\text{const}$. Приведены электрические и энергетические пусковые характеристики, как на входе двигателя, так и на входе преобразователя. Предлагается рассчитывать величины питающего двигателя напряжения, соответствующие определенным частотам напряжения питания и частотам вращения ротора по аналитической зависимости. Определена энергетическая эффективность анализируемого пуска при учете всех составляющих энергетических потерь.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, частотный пуск, закон регулирования, математическое моделирование пуска, энергетическая эффективность пуска.

Введение

Плавный пуск асинхронного двигателя (АД) с помощью частотных преобразователей исследовался многими авторами [1–4] как экспериментально, так и теоретически. Вместе с тем некорректность математического моделирования процессов пуска, связанная прежде всего с неточностью определения параметров схемы замещения двигателя для разных временных точек пуска при различных нагрузках на валу и неучетом всех составляющих энергетических потерь, предопределяет необходимость сопоставления экспериментальных и теоретических пусковых характеристик с целью корректировки математической модели.

1. Постановка задач исследования

В отличие от закона частотного управления первого уровня $U/f=\text{const}$, связывающего величины и частоты питающего двигателя напряжения, закон второго уровня $E/f=\text{const}$ обеспечивает постоянство потокосцепления ротора. Определение величины питающего двигателя напряжения для закона второго уровня $U_{E/f=\text{const}}$, соответствующего определенной частоте питания и частоте вращения ротора, может быть выполнено по аналитической зависимости, использующей текущие значения параметров эквивалентной схемы замещения двигателя и скольжения [5–8]. Так для рассматриваемого закона $E/f=\text{const}$ эта зависимость имеет следующий вид:

$$U_{E/f=\text{const}} = U_{U/f=\text{const}} \cdot l \cdot \left(1 + \left(\frac{x_2' s}{r_2'} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

где

$$l = \left[\frac{\left(\frac{r_0 r_2'}{s} + r_1 (r_0 + r_2' / \beta) - x_1 \alpha (x_0 + x_2') - x_2' x_0 \alpha \right)^2}{\left(\frac{r_0 r_2'}{s} - x_2' x_0 \alpha \right)^2} + \frac{\left(x_1 \alpha (r_0 + r_2' / \beta) + \frac{x_0 r_2'}{s} + r_0 x_2' \alpha + r_1 (x_0 + x_2') \right)^2}{\left(\frac{x_0 r_2'}{s} + r_0 x_2' \alpha \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$\beta = f_2 / f_{1n} = as$ – абсолютное скольжение, равное отношению текущей частоты тока в обмотке ротора f_2 к номинальной частоте преобразователя; $\alpha = f_1 / f_{1n}$.

Найденные значения напряжений используются при решении системы нелинейных уравнений, описывающей режим пуска. Для рассматриваемого закона частотного управления различными являются нелинейные коэффициенты дифференциальных уравнений (параметры схем замещения), потери в стали магнитопровода, добавочные и механические потери. Указанные составляющие потерь, определенные для статических режимов, позволяют рассматривать энергетические показатели в переходных режимах [9–11]. Уравнения равновесия трехфазного двигателя в системах записаны в двухфазных коор-

динахах. Такой переход от симметричной трехфазной машины к эквивалентной двухфазной обеспечивает упрощение уравнений и сокращение их числа в системе, в отличие от представления уравнений в реальных фазовых координатах. На вид пусковых характеристик в существенной степени влияет характер изменения момента нагрузки на каждом шаге интегрирования системы уравнений, а также момент инерции привода и скорость нарастания параметра регулирования – частоты преобразователя. Современные транзисторные преобразователи частоты, работающие по принципу широтно-импульсной модуляции с высокой частотой коммутации, обеспечивают на выходе напряжение, близкое к синусоиде, и это позволяет при анализе переходных процессов пренебрегать временными высшими гармоническими. Тогда система, описывающая электрические и механические процессы в асинхронной машине, включает в себя пять уравнений:

$$\begin{aligned} u_{s\alpha} &= i_{s\alpha} \cdot r_1 + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt}; \\ u_{s\beta} &= i_{s\beta} \cdot r_1 + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt}; \\ u_{r\alpha} &= i_{r\alpha} \cdot r_2 + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \cdot \Psi_{r\beta}; \\ u_{r\beta} &= i_{r\beta} \cdot r_2 + \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \cdot \Psi_{r\alpha}; \\ \frac{m \cdot p}{2} (\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}) &= \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \pm M_C, \end{aligned} \quad (3)$$

где $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$, $u_{r\alpha}$, $u_{r\beta}$ – напряжения соответственно на статорной и роторной обмотках по осям α и β ; $\Psi_{s\alpha}$, $\Psi_{s\beta}$, $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ – соответствующие потокоцепления обмоток статора и ротора; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ – токи в статорных и роторных обмотках; ω_r – угловая частота вращения вала; p – число пар полюсов; m – число фаз двигателя ($m=3$); J – суммарный момент инерции привода, приведенный к валу двигателя; M_C – момент сопротивления механизма. В то же время для учета пространственных высших гармонических составляющих необходимо увеличить количество уравнений соответственно числу учитываемых пространственных гармоник. Как уже указывалось, в составе уравнений присутствуют нелинейные коэффициенты, которые необходимо определить для каждой точки интегрирования. Поэтому до анализа переходных процессов пуска следует провести расчет установившихся режимов с учетом вытеснения токов в роторе и насыщения магнитопровода и получить значения тре-

буемых параметров схемы замещения. Кроме того, при расчетах пуска учитываются изменения на каждом шаге интегрирования величины и частоты питающего напряжения. При различном характере нагрузки изменяется и момент нагрузки M_C , значение которого, соответствующее любой скорости привода, определяется по нагрузочной характеристике. Вышеописанные изменения обеспечивают повышение уровня адекватности математической модели реальным физическим процессам. Потребляемая двигателем условная активная мощность в динамических режимах рассчитывается через матрицы напряжений и токов.

$$P'_1 = \frac{3}{2} \cdot [u_{s\alpha} \cdot i_{s\alpha} + u_{s\beta} \cdot i_{s\beta}] \quad (4)$$

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

$$P_1 = P'_1 + \Delta P_{ст\,осн} + \Delta P_{ст\,доб} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}, \quad (5)$$

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

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

$$P_2 = \omega_r \cdot \frac{3p}{2} \cdot [i_{r\beta} \cdot \Psi_{r\alpha} - i_{r\alpha} \cdot \Psi_{r\beta}] - \Delta P_{мех} - \Delta P_{доб}. \quad (6)$$

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

Математическая модель, построенная на базе вышеописанных уравнений, позволяет провести расчеты частоты вращения, токов в фазах обмоток, электромагнитного момента, потерь, электромагнитных нагрузок, энергетических показателей в режиме пуска и оценить длительность переходного процесса. Рассмотрение такого энергетического показателя, как коэффициент мощности, нецелесообразно, поскольку на входе электропривода с транзисторным частотным преобразователем его величина практически неизменна и близка к единице.

2. Материалы и результаты исследований

Были проведены теоретические и экспериментальные исследования частотного пуска АД с определенной интенсивностью изменения па-

раметра регулювання при нарузке. Двигатель АИР71А2У3 ($P_n = 0,75$ кВт; $U_{н(\Delta Y)} = 220/380$ В; $I_{н(\Delta Y)} = 2,9/1,7$ А; $f = 50$ Гц; $n_n = 2823$ об/мин; $\eta_n = 77\%$; $\cos\phi_n = 0,87$; $M_n = 2,53$ Н·м); питался от транзисторного преобразователя частоты (ТПЧ) типа ALTIVAR-28. Обмотки статора АД имели соединение “звезда”. Линейное напряжение сети во время эксперимента составляло 380 В. Момент инерции двигателя с нагрузочным механизмом составлял $0,0017$ кг·м². Момент нагрузки на валу имел линейную зависимость от числа оборотов, что описывалось следующим уравнением: $M(n) = 0,2 + 0,825 \cdot n \cdot 10^{-3}$. Исследования были проведены при интенсивности нарастания частоты ТПЧ $16,66$ Гц/с и для закона частотного управления $E/f = \text{const}$. В процессе эксперимента осциллографировались токи и напряжения с помощью устройства BORDO-421 и затем, с использованием разработанной на базе MATLAB программы "Обработка результатов", было произведено построение в функции времени кривых изменения анализируемых переменных. В итоге пусковые характеристики строятся без дополнительных пересчетов по точкам. При математическом моделировании пусковых характеристик в соответствии с принципами системного подхода обеспечивается совместное рассмотрение преобразователя, двигателя и нагрузки [10], что реализовано в программном продукте DIMASDrive [12], разработанном на кафедре электрических машин Одесского национального политехнического университета.

На рис. 1. представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований частоты вращения двигателя при пуске для рассматриваемого закона регулирования.

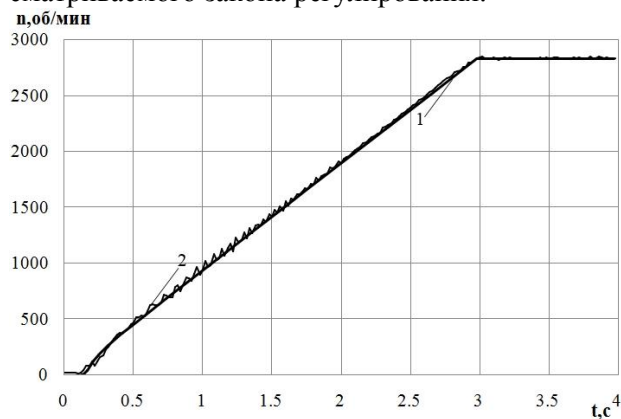
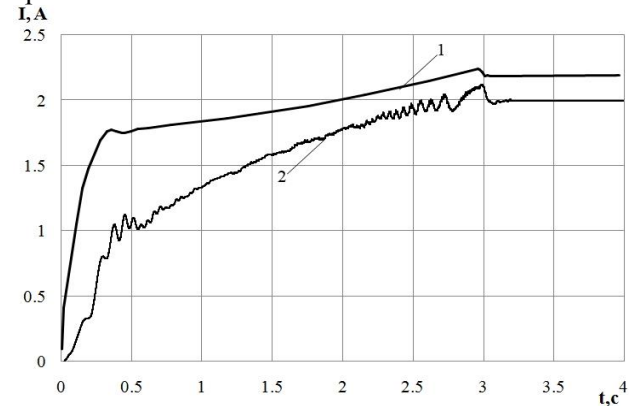


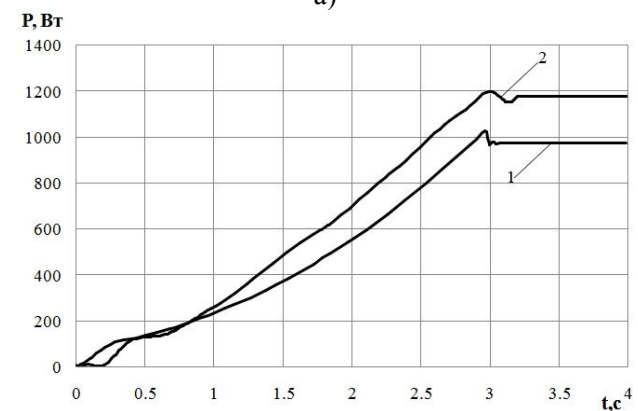
Рис.1. Характеристики частоты вращения:
1– теоретические; 2– экспериментальные;

На рис. 2 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований тока (а), мощности (б), потребляемых двигателем, и КПД (в) при пуске для рассматриваемого закона регулирования.

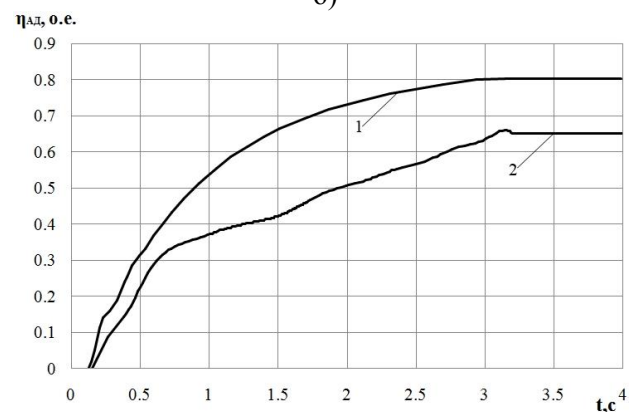
Из рисунка видно, что закономерности изменения потребляемого АД тока при пуске в компьютерном моделировании и эксперименте совпадают, с определенными числовыми погрешностями.



а)



б)



в)

Рис. 2. Пусковые характеристики тока (а), мощности (б) и КПД двигателя (в):
1– теоретические; 2– экспериментальные;

На рис. 3 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований потребляемых приводом тока (а), мощности (б) и КПД привода (в) при пуске для рассматриваемого закона регулирования.

Зависимости на рис. 3 позволяют рассчитать затраты электроэнергии на пуск, что характеризует энергетическую эффективность пуска. Она

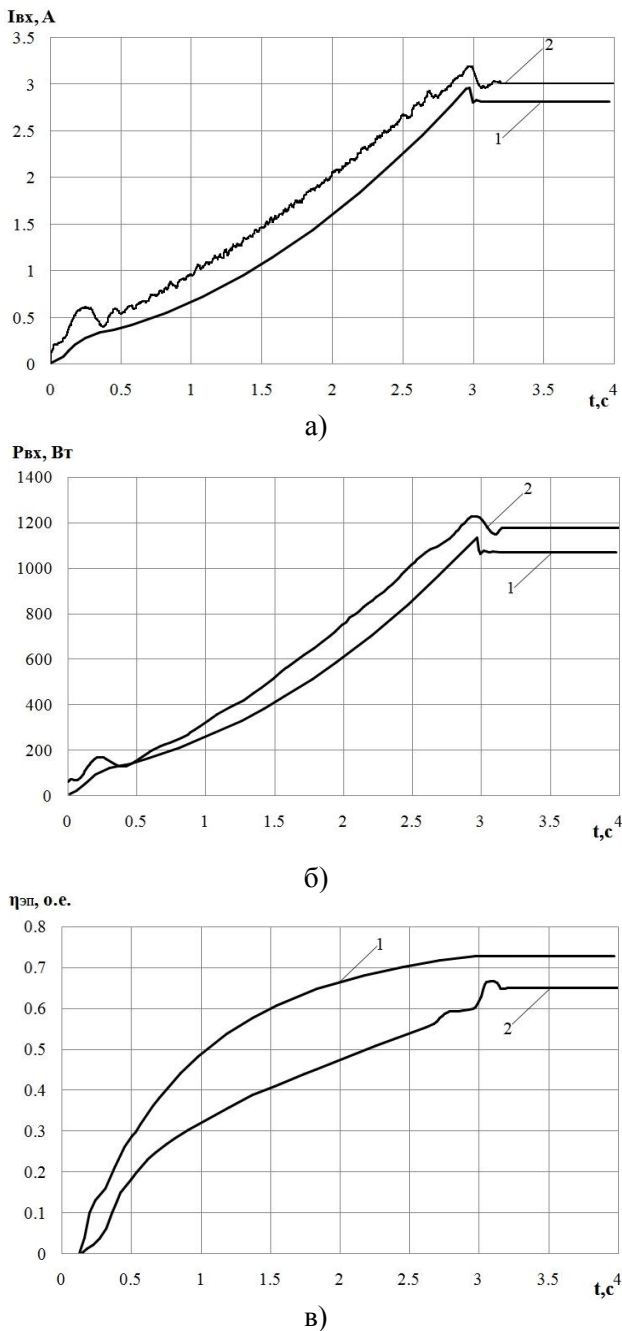


Рис. 3. Пусковые характеристики потребляемых приводом тока (а), мощности (б) и КПД привода (в): 1– теоретические; 2– экспериментальные;

составила 1698 Вт·с при экспериментальном исследовании и 1411 Вт·с при математическом моделировании.

Выводы

Предлагается аналитическое выражение для определения величины питающего двигатель напряжения, соответствующего определенной его частоте, которое использует текущие значе-

ния параметров эквивалентной схемы замещения и скольжения.

Бóльшие значения погрешности между экспериментом и моделированием наблюдаются в начальной стадии пуска для потребляемого двигателем тока и в конечной стадии пуска для потребляемой двигателем мощности и его КПД.

Наблюдается близость значений затрат электроэнергии на пуск при экспериментальных и теоретических исследованиях.

Список использованной литературы

1. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст] / М.: Издательский центр "Академия": – 2006. – 272 с.
2. Чермалых, В. М. Идентификация параметров физической системы частотнорегулируемого асинхронного электропривода и ее имитационной модели [Текст] / В. М. Чермалых, А. В. Чермалых, И. Я. Майданский // Електротехнічні та комп'ютерні системи: – 2011. – Вып. 3. – С.35–37.
3. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: моногр. [Текст] / Екатеринбург: УРО РАН: – 2000. – 654 с.
4. Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие [Текст]. – СПб.: КОРОНА принт: – 2001. – 320 с.
5. Петрушин, В. С., Таньков, А. А. Энергетические показатели асинхронного двигателя в частотном электроприводе при различных законах управления [Текст] / В. С. Петрушин, А. А. Таньков // "Електромаши́нне будівництво та електрообладнання": Респ. міжвід. наук.-техн. зб.: – 2000. – Вып. 55. – С. 11–15.
6. Пивняк, Г. Г., Волков, О. В. Современные частотно регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. Монография, Днепропетровск [Текст] / Г. Г. Пивняк, О. В. Волков // Национальный горный университет: – 2006. – 470 с.
7. Петрушин, В. С. Многоаспектное моделирование работы регулируемых асинхронных двигателей при разных законах частотного управления [Текст] / В. С. Петрушин, А. М. Якимец, Р. Н. Еноктаев // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": – 2015. – Вып. 12 (1121). – С. 101–106.
8. Петрушин, В. С. Регулировочные характеристики АД в частотном электроприводе при законах управления, обеспечивающих постоянство потокосцеплений [Текст] // Елект-

ротехніка і електромеханіка: Науково-практичний журнал: – 2002. – Вып. 2. – С. 53–55.

9. Петрушин, В. С., Якимец, А. М. Моделирование динамических режимов асинхронных двигателей при частотном регулировании [Текст] / В. С. Петрушин, А. М. Якимец // Проблемы автоматизированного привода. Вестник Национального технического университета "ХПИ": – 2001. – Вып. 10. – С. 156–157.

10. Петрушин, В. С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" [Текст] // Одесса, Наука и техника: –2006. – 320 с.

11. Ефимов, И. Г. Стенд для исследований частотно-регулируемых электроприводов [Текст] / 5 международная конференция по автоматизированному электроприводе АЭП-2007, Санкт-Петербург:– 2007. – С. 216–218

12. 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: – Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001.

References

1. Sokolovskii, G. G. (2006), *AC drives with frequency regulation [Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem]*, Izdatel'skii tsentr «Akademiiia». Moscow. 272 p.

2. Chermalykh, V. M., Chermalykh, A. V., Maidanskii, I. Ia. (2011), "Identification parameters of the physical system variable frequency induction motor and its simulation model " ["Identifikatsiia parametrov fizicheskoi sistemy chastotno- reguliruемого асинхронного электропривода i ee imitatsionnoi modeli"], *Elektro-tekhnicni ta komp'uterni sistemi*, No. 3, pp. 35–37.

3. Shreiner, R. T. (2000), *Mathematical modeling of AC drives with solidstate frequency converters [Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateliami chastoty]*, URO RAN. Ekaterinburg. 654 p.

4. German-Galkin, S. G. (2001), *Computer modeling of semiconductor systems in Matlab 6.0 [Komp'uternoe modelirovanie polupro-vodnikovyykh sistem v Matlab 6.0]*, Uchebnoe posobie. SPb., KORONA. 320 p.

5. Petrushin, V. S., Tan'kov, A. A. (2000), "The energy performance of the induction motor in the drive frequency at different control laws" ["Energeticheskie pokazateli асинхронного

dvigatel'ia v chastotnom elektroprivode pri razlichnykh zakonakh upravleniia"], *Elektromashinobuduvannia ta elektroobladnannia, Resp. mizhvid.nauk.-tekh. zb.*, No. 55, pp. 11–15.

6. Pivniak, G. G., Volkov, O. V. (2006), *Modern frequency controlled asynchronous electric drives with pulse-width modulation [Sovremennye chastotno-reguliruemye асинхронные электроприводы s shirotno-impul'snoi moduliatsiei]*, Natsional'nyi gornyi universitet. Dnepropetrovsk. 470 p.

7. Petrushin, V. S., Iakimets, A. M., Enoktaev, R. N. (2015), "Multidimensional modeling of asynchronous motors regulated under different laws of frequency control" ["Mnogoaspektnoe modelirovanie raboty reguliruemykh асинхронных dvigatelei pri raznykh zakonakh chastotnogo upravleniia"], *Vestnik Nats. tekh. un-ta "KhPI"*, No.12(1121), pp. 101–106.

8. Petrushin, V. S. (2002), "Control characteristics of IM in the frequency electric drive with control laws that provide permanence flux linkage" ["Regulirovochnye kharakteristiki AD v chastotnom elektroprivode pri zakonakh upravleniia, obespechivaiushchikh postoianstva potokostsepleniia"], *Elektrotehnika i elektromekhanika, Naukovo-praktichnii zhurnal*, No. 2, pp. 53–55.

9. Petrushin, V. S., Iakimets, A. M. (2001), "Simulation of dynamic modes of asynchronous motors with frequency regulation" ["Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov асинхронных dvigatelei pri chastotnom regulirovanii"], *Problemy avtomatizirovannogo privoda, Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI"*, No.10, pp. 156–157.

10. Petrushin, V. S. (2006), *Textbook. Induction motors in adjustable electric [Uchebnoe posobie. Асинхронные dvigateli v reguliruемом elektroprivode]*, Science and Technology Publ. Odessa. 320 p.

11. Efimov, I. G. (2007), "Stand for research variable frequency drives" ["Stend dlia issledovaniia chastotno- reguliruemykh elektroprivodov"], *5 mezhdunarodnaia konferentsiia po avtomatizirovanomu elektroprivodu AEP*. St. Petersburg. pp. 216–218.

12. Petrushin V. S., Rjabinin S. V., Jakimec A. M., "The software product "DIMASDrive". Analysis program of work, selection and design of asynchronous cage motors tion system so controlled drive (evidence of a PA program registration number 4065)" [Programmnyj produkt „DIMASDrive”. Programma analiza raboty, vybora i proektirovanija асинхронных короткозамкнутых dvigatelej sistem reguliruемого jelektroprivoda (svidetel'stvo o registracii

programmy PAN№4065)], (2001), Gosudarstvennyj departament intelektual'noj sobstvennosti, Kiev.

A STUDY OF THE FREQUENCY START INDUCTION MOTOR WITH REGULATION LAW $E/f = \text{const}$

V. Petrushin, A. Yakimets, R. Yenoktaiev, A. Bibik
Odessa National Polytechnic University

Abstract. Theoretical and experimental study of the frequency of the induction motor starting AIR71A2U3 at law $E/f = \text{const}$ regulation. Power and energy are shown starting performance as to the engine inlet, and the inverter input. In mathematical modeling the equivalent circuit parameters, which are nonlinear coefficients in the system of differential equations are different for different points of consideration are the start and as a result of electromagnetic calculation under appropriate voltages and frequencies in the engine inlet considering the saturation of the magnetic circuit and the displacement current in the rotor winding. Non-linear coefficients of the equations, as well as losses in the magnetic steel, and additional mechanical losses are different for each of the law of frequency management and change at every step of the integration of the system of differential equations. Their determination is made in the analysis of the static modes. Accounting for the aforementioned loss components allows to specify calculation of energy performance under transient conditions. It is proposed to calculate the value of the motor voltage corresponding to certain frequencies of the supply voltage and rotor speed on the analytic dependence. Found voltages used in solving systems of nonlinear equations describing the start mode. The energy efficiency of the analyzed start taking into account all the components of the energy losses.

Key words: asynchronous electric drive, frequency start, regulatory law, mathematical modeling of start, start energy efficiency.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНОГО ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ЗАКОНІ РЕГУЛЮВАННЯ $E/f = \text{const}$

В. С. Петрушин, А. М. Якімець, Р. М. Єноктаєв, А. В. Бібік
Одеський національний політехнічний університет

Анотація. Виконано теоретичне і експериментальне дослідження частотного пуску асинхронного двигуна AIR71A2U3 при законі регулювання $E/f = \text{const}$. Наведено електричні та енергетичні пускові характеристики як на вході двигуна, так і на вході перетворювача. Пропонується розраховувати величини живлячої двигун напруги, що відповідають певним частотам напруги живлення і частотам обертання ротора, за аналітичними залежностями. Визначено енергетичну ефективність аналізованого пуску при врахуванні всіх складових енергетичних втрат.

Ключові слова: асинхронний електропривод, частотний пуск, закон регулювання, математичне моделювання пуску, енергетична ефективність пуску

Получено 20.01.2017



Петрушин Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (048)734-8494. E-mail: viktor_petrushin@ukr.net

Viktor Petrushin, Sc. D. , head of Electric Cars Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph.(048)734-8494. E-mail: viktor_petrushin@ukr.net

ORCID ID: 0000-0003-2659-126X



Якимец Андрей Миронович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ. E-mail: yakimets_andriy@ukr.net

Andrei Yakimets, Ph. D, Electric Cars Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU. E-mail: yakimets_andriy@ukr.net

ORCID ID: 0000-0002-0740-9154



Еноктаев Ростислав Николаевич, аспирант Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (097)046-30-70. E-mail: rostik-enok@inbox.ru

Rostislav Yenoktaiev, Graduate student of ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph. (097)046-30-70. E-mail: rostik-enok@inbox.ru

ORCID ID: 0000-0003-1577-9822



Бибик Артур Витальевич, старший преподаватель Одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (048)705-84-67. E-mail: cj51@rambler.ru

Artur Bibik, Senior Lecturer of ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ONPU, ph. (048)705-84-67. E-mail: cj51@rambler.ru

ORCID ID: 0000-0002-3212-2075