

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ШЕСТИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ЧАСТОТНОМУ РЕГУЛЮВАННІ

В. С. Петрушин¹, Ю. Р. Плоткін², А. М. Якімець¹,
Р. М. Єноктаєв¹, В. В. Горошко¹, А. С. Кириленко¹

¹Державний університет «Одеська політехніка»

²Берлінський університет економіки і права

Анотація. Запропоновано математичну модель шестифазного асинхронного електродвигуна, що дозволяє визначити експлуатаційні характеристики при частотному регулюванні. У моделі виключаються з розгляду вищі просторові гармоніки відповідних порядків. Результати математичного моделювання підтверджено експериментальними дослідженнями. Спільний розгляд сімейства механічних характеристик та навантажувальної характеристики надає можливість перейти до регулювальних характеристик, що являють собою залежності струмів і споживаних потужностей від частот обертання на вході приводу і на вході двигуна. Визначено відносну похибку теоретично розрахованих за допомогою моделі параметрів щодо результатів експериментальних досліджень.

Ключові слова: шестифазний асинхронний двигун, математичне моделювання, експериментальні дослідження, регулювальні характеристики, відносна похибка.

Вступ

Удосконалення найбільш поширеного асинхронного частотного електроприводу можливо при використанні в ньому шестифазного короткозамкненого двигуна [1,2]. При збільшенні числа фаз регульованого асинхронного двигуна (РАД) спостерігається підвищення енергетичних показників, зниження пульсацій моменту і швидкості на валу двигуна, що забезпечує підвищену надійність при зменшених рівнях шуму і вібрації [3,4]. В той же час такий керований електропривод може бути побудований при використанні шестифазного перетворювача частоти при керуванні від спільного мікроконтролера, який забезпечує синхронне керування. Перетворювач створює дві симетричні трифазні системи напруги. Часовий зсув цих систем між собою дорівнює просторовому зсуву між двох трифазних обмоток двигуна.

Ціль роботи: за допомогою експериментальних досліджень підтвердити адекватність математичної моделі шестифазний регульованого асинхронного двигуна при частотному управлінні і порівняти регулювальні характеристики трифазних і шестифазних двигунів.

1. Математична модель шестифазного асинхронного двигуна

Шестифазні асинхронні двигуни можуть бути створені на базі серійних трифазних двигунів

© Петрушин В.С., Плоткін Ю. Р.,
Якімець А. М., Єноктаєв Р. М.,
Горошко В. В., Кириленко А. С., 2021

основного виконання. При наявності в трифазних АД парної кількості пазів на полюс і фазу q , за рахунок зменшення їхньої кількості вдвічі отримуємо шестифазну модифікацію [5]. Відповідно вдвічі зменшується перетин ефективного провідника. При цьому геометрія активної частини не змінюється. Число ефективних провідників в пазу, при однаковому з трифазним АД числом паралельних гілок обмотки статора, збільшується вдвічі. Внаслідок цього вдвічі збільшується активний опір обмотки статора. Більші значення у порівнянні з трифазним АД мають також інші параметри заступної схеми шестифазної машини. Зокрема підвищення опору гілки намагнічування призводить, відповідно, до зменшення струм намагнічування фази. Шестифазний РАД має більший обмотувальний коефіцієнт за рахунок меншого значення q і в результаті збільшується магнітний потік і крутний момент, менше додаткові втрати за рахунок поліпшеного гармонійного складу магнітного поля в повітряному зазорі [6].

У моделі шестифазного РАД виключаються з розгляду вищі просторові гармоніки (ВПГ) 5, 7 і кратного ним порядку [7].

Розглянемо асинхронний двигун, в статор якого укладено дві окремі трифазні обмотки, кожна з яких з'єднана в «зірку». Позначимо їх 1У і 2У, а їхні фази відповідно А1, В1, С1 і А2, В2, С2. Обмотка 2У зсунута щодо 1У на $30^\circ_{\text{ел.}} (\pi/6)$ і разом вони утворюють шестифазну обмотку, що складається з двох трифазних груп. Для двополусної машини ($2p = 2$) с числом пазів статора $Z_1 = 12$ число пазів на полюс і фазу становить $q = 1$. У такому випадку обмотка вважається зо-

середженої і кожна фаза створює в повітряному проміжку МРС прямокутної форми. Використовуючи розкладання в ряд Фур'є для прямокутної форми кривої МРС окремої котушки:

$$F_{kv} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \cdot \sin(\omega t) \cdot \frac{\sin\left(\pi \frac{T_0}{T} \cdot v\right)}{\pi \cdot v} \times \cos\left(\frac{2\pi}{T} x \cdot v\right),$$

де T_0 – крок котушки, T – просторова координата, що дорівнює подвійному полюсному діленню $T = 2 \cdot \tau$, v – порядок гармоніки, x – змінна просторова координата.

У випадку вибору початку координат за віссю фази А1 та з урахуванням просторового зсуву фаз В1 та С1 відповідно на 120° та 240° , буде отримано значення МРС фазних обмоток першої трифазної групи (1Y):

$$F_{A1} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \cdot \sin(\omega t) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot v\right)}{\pi \cdot v} \cdot \cos\left(v \cdot \frac{2\pi}{T} x\right),$$

$$F_{B1} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot v\right)}{\pi \cdot v} \times \cos\left(v \cdot \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}\right)\right),$$

$$F_{C1} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot v\right)}{\pi \cdot v} \times \cos\left(v \cdot \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3}\right)\right).$$

Результуюча МРС від фазних обмоток першої групи $F_{1Y} = F_{A1} + F_{B1} + F_{C1}$. МРС 1-ї гармоніки групи 1Y:

$$F_{1Y1} = \frac{1}{\pi} I_m w \times \left[\begin{aligned} & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x\right) + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) + \\ & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) + \\ & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{8\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right) \end{aligned} \right]$$

Складові МДС, зсунуті на кут 120° взаємно знищуються і в результаті отримуємо:

$$F_{1Y1} = \frac{3}{\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right)$$

Аналогічним чином для інших гармонік. Для п'ятої:

$$F_{1Y5} = \frac{3}{5\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x\right)$$

для сьомої:

$$F_{1Y7} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x\right)$$

для одинадцятій:

$$F_{1Y11} = \frac{3}{11\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t + \frac{22\pi}{T} x\right)$$

для тринадцятій:

$$F_{1Y13} = \frac{3}{13\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{26\pi}{T} x\right)$$

МРС фазних обмоток другої групи (2Y) визначається з урахуванням просторового зсуву котушок на $\pi/6$ і зсуву струмів у часі другої трифазної групи теж на $\pi/6$ періоду:

$$F_{A2} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot v\right)}{\pi \cdot v} \times \cos\left(v \cdot \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}\right)\right),$$

$$F_{B2} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot v\right)}{\pi \cdot v} \times \cos\left(v \cdot \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}\right)\right),$$

$$F_{C2} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{9\pi}{6}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot v\right)}{\pi \cdot v} \times \cos\left(v \cdot \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}\right)\right).$$

Результуюча МРС для першої гармоніки групи 2Y:

$$F_{2Y1} = \frac{3}{\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right)$$

Аналогічним чином і для гармонік вищих порядків. Для $v = 5$:

$$F_{2Y5} = \frac{3}{5\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi\right)$$

для $v = 7$:

$$F_{2Y7} = \frac{3}{7\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi\right)$$

для $v = 11$:

$$F_{2Y11} = \frac{3}{11\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t + \frac{22\pi}{T} x\right)$$

для $\nu = 13$:

$$F_{2Y13} = \frac{3}{13\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{26\pi}{T} x\right)$$

Складаючи відповідні гармоніки МРС трифазних обмоток обох груп (1Y і 2Y) отримуємо вираз загальної МРС першої гармоніки:

$$F_{\Sigma 1} = \frac{6}{\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x\right)$$

Для п'ятої і сьомої гармонік

$$F_{\Sigma 5} = \frac{3}{5\pi} I_m w \cdot \left[\begin{array}{l} \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x\right) + \\ + \sin\left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi\right) \end{array} \right] = 0,$$

$$F_{\Sigma 7} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \cdot \left[\begin{array}{l} \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x\right) + \\ + \sin\left(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi\right) \end{array} \right] = 0.$$

В то же час сумарна МРС 11-ї і 13-ї гармонік дорівнює арифметичній сумі МРС от струмів в обох трифазних обмотках 1Y і 2Y, оскільки їх результуючі вектори співпадають за фазою:

$$F_{\Sigma 11} = \frac{6}{11\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t + \frac{22\pi}{T} x\right),$$

$$F_{\Sigma 13} = -\frac{6}{13\pi} I_m w \cdot \sin\left(\omega t - \frac{26\pi}{T} x\right).$$

Аналогічні розрахунки можна провести і для гармонійних складових МРС більш високих порядків, за результатами яких видно, що в спектральному складі, крім основної 1-ї гармоніки, містяться лише просторові гармоніки порядків $12k \pm 1$, де $k = 1, 2, 3, 4, \dots$, тобто 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47, 49

Зокрема в спектрі ВПГ поряд з основною гармонікою присутні й гармоніки порядків: 11, 13, 23, 25, 35, 37. В залежності від напрямку обертання поля гармоніки є руховими або гальмівними.

2. Експериментальні дослідження шести-фазного двигуна при частотному регулюванні

На кафедрі електричних машин Державного університету «Одеська політехніка» розроблений програмний продукт *DIMASDrive* [8], що дозволяє проводити електромагнітні, електромеханічні, теплові, віброакустичні, механічні розрахунки

багатофазних регульованих асинхронних двигунів.

Математична модель забезпечує спільний розгляд перетворювача, двигуна та навантажувального механізму і враховує зміну параметрів заступних схем двигуна при регулюванні внаслідок насичення сталі магнітопроводу і витіснення струму в роторній обмотці РАД.

При розробці математичної моделі приймалися такі спрощують припущення: обмотки статора і ротора симетричні; вентиля ідеальні, їх комутація миттєва; опір вентилів у відкритому і провідність в закритому станах дорівнюють нулю; взаємний вплив гармонік напруги відсутній.

Для підтвердження викладених вище теоретичних положень на стенді (рис.1) були проведені експериментальні дослідження двох частотно-регульованих асинхронних двигунів: трифазного і шестифазного.

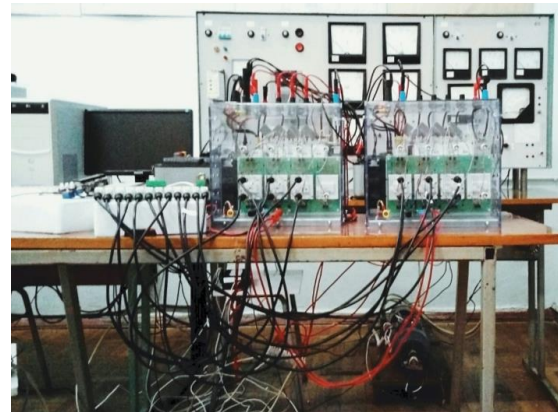


Рис. 1. Загальний вигляд експериментального стенду

Серійний асинхронний двигун АР71А2У3 отримує живлення від трифазного транзисторного перетворювача частоти SEMITEACH. Обмотка статора двигуна була з'єднана зіркою. Напруга в мережі під час експерименту становила 380 В при частоті 50 Гц. Частота модуляції перетворювача 6 кГц. На базі серійного АД була виконана його шестифазна модифікація. Для створення шестифазного частотного перетворювача були використані два трифазних перетворювача SEMITEACH.

Експерименти проводилися при законі частотного регулювання $U/f = \text{const}$ для низки частот від 20 до 60 Гц. На рис.2 представлено сімейство механічних характеристик РАД при різних частотах, на яке накладається лінійна навантажувальна характеристика, що забезпечується навантажувальним генератором стенду. За допомогою цього здійснюється перехід до регульованих характеристик.

На рис.3 наведено теоретичні та експериментальні регульовальні характеристики струмів

трифазних і шестифазних двигунів на вході двигуна I_1 (а) і на вході приводу I_1' (б).

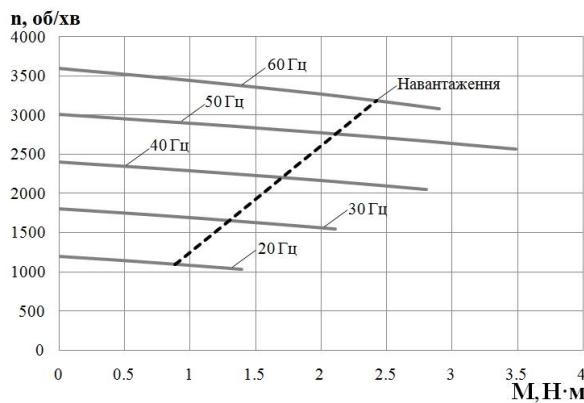


Рис. 2. Сімейство механічних характеристик для різних частот і навантажувальна характеристика

На рис.4 наведено теоретичні та експериментальні регульовальні характеристики споживаних активних потужностей трифазного і шестифазного двигунів на вході двигуна P_1 (а) і на вході приводу P_1' (б).

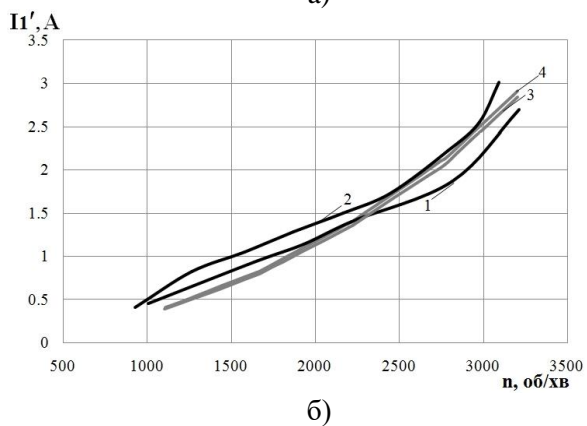
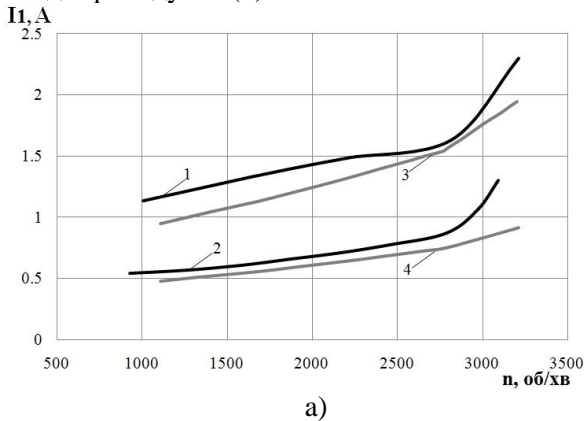


Рис. 3. Регульовальні характеристики струмів на вході двигуна (а) і на вході приводу (б): 1, 2 – експериментальні для трьох та шестифазного відповідно, 3, 4 – теоретичні для трьох та шестифазного відповідно

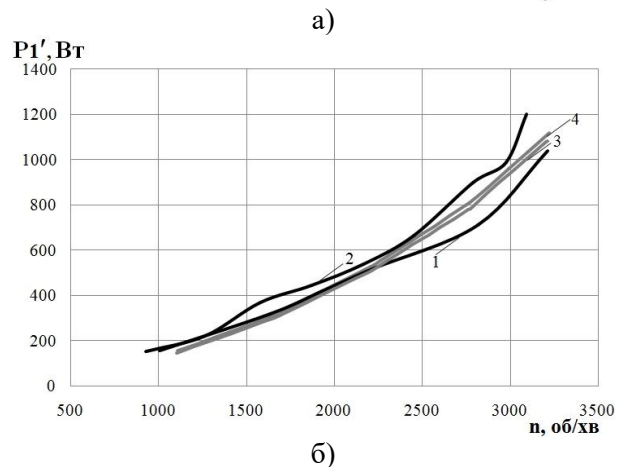
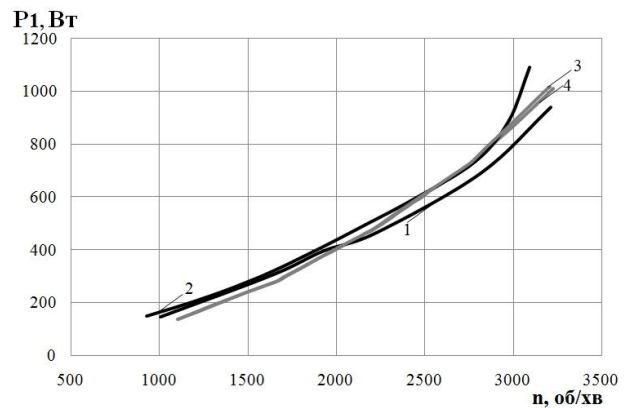


Рис. 4. Регульовальні характеристики споживаних активних потужностей на вході двигуна (а) і на вході приводу (б): 1, 2 – експериментальні для трьох та шестифазного відповідно, 3, 4 – теоретичні для трьох та шестифазного відповідно

Висновки

1. Експериментальні дослідження підтвердили зменшені значення фазних струмів на вході шестифазного двигуна відносно фазних струмів на вході трифазного двигуна приблизно у два рази.
2. Значення споживаних активних потужностей на вході двигуна та вході приводу, а також значення струмів на вході приводу для трьохфазних та шестифазних двигунів близькі, що спостерігається як при експериментальних дослідженнях, так і при математичному моделюванні.
3. Середня відносна похибка теоретичного визначення за допомогою математичної моделі щодо результатів експериментальних досліджень в розглянутому діапазоні регулювання дорівнює:
 - для струмів на вході двигуна : трифазного 12 %, шестифазного 19,9 %;
 - для струмів на вході приводу: трифазного 11,5 %, шестифазного 15,9 %;
 - для потужностей на вході двигуна: трифазного 10,5 %, шестифазного 10 %.

- для потужностей на вході приводу: трифазного 9,7 %, шестифазного 10,7 %;

Похибка суттєво зростає при переході до ненасиченого стану двигунів (при живленні напругою з частотою вище 50 Гц).

4. Використовуючи отримані похибки можливо керуватися при здійсненні корегування математичних моделей, зокрема врахування втрат від вищих часових гармонік, що покращить теоретичний аналіз роботи частотно-регульованих електроприводів.

Список використаної літератури

1. Дацковский Л. Х. Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) / Л. Х. Дацковский, В. И. Роговой. // Электротехника. – 1996. – №10.

2. Сидельников Б. В. Шестифазные частотно-регулируемые асинхронные двигатели большой мощности / Б. В. Сидельников. // Известия РАН: Энергетика. – 2000. – №3. – С. 31–38.

3. Голубев А. Н. Влияние числа фаз статорной обмотки асинхронного двигателя на его виброшумовые характеристики / А. Н. Голубев, С. В. Игнатенко. // Электротехника. – 2000. – №6. – С. 28–31.

4. Разработка шестифазного регулируемого асинхронного двигателя / В. С.Петрушин, Ю. Р. Плоткин, Р. Н. Еноктаев, О. И. Шестаков. // Научно-практический журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – 2015. – №20. – С. 35–41.

5. Сравнение эксплуатационных характеристик многофазных регулируемых асинхронных двигателей / В. С.Петрушин, Л. Я. Беликова, Ю. Р. Плоткин, Р. Н. Еноктаев. // Научно-практический журнал "Електротехніка і Електромеханіка". – 2016. – №1. – С. 38–41. DOI: 10.20998/2075-272X.2016.1.07

6. Nanoty A. Control of Designed Developed Six Phase Induction Motor / A. Nanoty, A. R. Chudasama. // International Journal of Electromagnetics and Applications. – 2012. – №2. – С. 77–84.

7. Лущик В. Д. Шестифазна обмотка асинхронних двигунів / В. Д. Лущик. // Научно-практический журнал "Електротехніка і Електромеханіка". – 2012. – №2. – С. 42–44.

8. 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) [Электронный ресурс]. – Киев: – Государственный департамент интеллектуальной собственности,

26.03.2001. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

References

1. Datskovskiy, L. and Rohovoi, V., (1996). Current state and trends in asynchronous frequency-controlled electric drive (brief analytical review) [Sovremennoe sostoyanie i tendentsii v asinhronnom chastotno-reguliruемом электроприводе (kratkiy analiticheskiy obzor)]. *Elektrotehnika*, 10.

2. Sidelnikov, B., (2000). High power six-phase variable frequency induction motors [Shestifaznyie chastotno-reguliruemyie asinhronnyie dvigateli bolshoy moschnosti]. *Izvestiya RAN: Energetika*, 3, pp.31–38.

3. Golubev, A. and Ignatenko, C., (2000). The influence of the number of phases of the stator winding of an induction motor on its vibration and noise characteristics [Vliyaniye chisla faz statornoй obmotki asinhronnogo dvigatelya na ego vibroshumovyye harakteristiki]. *Elektrotehnika*, 6, pp.28–31.

4. Petrushin, V., Plotkin, Y., Enoktayeв, R. and Shestakov, O., (2015). Development of a three-phase variable induction motor [Razrabotka shestifaznogo reguliruyemogo asinhronnogo dvigatelya]. *Naukovo-praktichiy zhurnal «Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi»*, 20, pp.35–41.

5. Petrushin, V., Belikova, L., Plotkin, Y. and Enoktayeв, R., (2016). Comparison of the performance characteristics of multiphase variable induction motors [Sravneniye ekspluatatsionnykh kharakteristik mnogofaznykh reguliruyemykh asinhronnykh dvigateley]. *Naukovo-praktichiy zhurnal «Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi»*, 1, pp.38–41.

6. Nanoty, A. and Chudasama, A., (2012). Control of Designed Developed Six Phase Induction Motor. *International Journal of Electromagnetics and Applications*, 2, pp.77–84.

7. Lushchik, V., (2012). Six-phase winding of induction motors. *Naukovo-praktichiy zhurnal «Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi»*, 2, pp.42–44.

8. Petrushin, V. S., Rjabinin, S. V., Jakimec, A. M. (2001). "The software product "DIMASDrive". The program of analysis of work, selection and design of asynchronous squirrel-cage motors of variable speed drive systems (evidence of a PA program registration number 4065) " [Programmnyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnykh korotkozamknutykh dvigateley sistem reguliruyemogo jelektroprivoda (svidetel'stvo o registracii programmy PAN№4065. CD)], [Electronic Resource] Gosudarstvennyj department intellektual'noj sobstvennosti, Kiev.

MATHEMATICAL MODEL OF A SIX-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR WITH FREQUENCY CONTROL

V. Petrushin¹, Y. Plotkin², A. Yakimets¹,
R. Yenoktaiev¹, V. Horoshko¹, A. Kirilenko¹

¹Odessa Polytechnic State University

²Berlin School of Economics and Law

Abstract. A mathematical model of a six-phase asynchronous electric motor is proposed, which allows to determine the operational characteristics at speed control. The model excludes higher spatial harmonics 5, 7 and a multiple of them from consideration. The results of mathematical modeling were confirmed by experimental studies. The experimental mechanical characteristics of a six-phase motor have a different slope than a three-phase. Consideration of the family of mechanical characteristics (at different frequencies of supply voltage and values of this voltage according to volts per hz speed control $U/f=\text{const}$) and the load characteristics makes it possible to move to the control characteristics, which are the dependence of currents and power consumption on speeds, both at the drive input and at the motor input. A comparison of the control characteristics of three and six-phase motors, which showed a significant difference in currents and the proximity of the values of power consumption at the input of the motor. Also, close values of currents and power consumption at the input of the drive. The relative error of the theoretically calculated by means of mathematical model of the corresponding parameters concerning results of experimental researches is defined. The error increases significantly during the transition to the unsaturated state of the motor. Using the obtained errors, it is possible to adjust the mathematical model, in particular the take to account losses from higher time harmonics that will improve the theoretical analysis of work frequency-controlled electric drives. Experimental studies have confirmed that the values of the currents at the input of a six-phase motor comparatively to the currents at the input of a three-phase motor have decreased approximately in twice.

Keywords: six-phase asynchronous motor, mathematical modeling, experimental research, control characteristics, relative error.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ШЕСТИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

В. С. Петрушин¹, Ю. Р. Плоткин², А. М. Якимец¹,
Р. М. Еноктаев¹, В. В. Горошко¹, А. С. Кириленко¹

¹Государственный университет «Одесская политехника»

²Берлинский университет экономики и права

Аннотация. Предложена математическая модель шестифазной асинхронного электродвигателя, которая позволяет определить эксплуатационные характеристики при частотном регулировании. В модели исключаются из рассмотрения высшие пространственные гармоники соответствующих порядков. Результаты математического моделирования подтверждена экспериментальными исследованиями. Совместное рассмотрение семейства механических характеристик и нагрузочной характеристики позволяет перейти к регулировочным характеристикам, которые представляют собой зависимости токов и потребляемых мощностей от частот вращения на входе привода и на входе двигателя. Определены относительную погрешность теоретически рассчитанных с помощью модели параметров и по результатам экспериментальных исследований.

Ключевые слова: шестифазный асинхронный двигатель, математическое моделирование, экспериментальные исследования, регулировочные характеристики, относительная погрешность.

Отримано 28.04.2021



Петрушин Віктор Сергійович, Державний університет «Одеська політехніка», доктор технічних наук, професор кафедри електричних машин, 65044, Одеса, проспект Шевченка, 1, тел. (048) 734-8494.
E-mail: victor_petrushin@ukr.net

Viktor Petrushin, Odessa Polytechnic State University, Sc.D., Professor of Electric Machines Department, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1, ph.(048)734-8494.
E-mail: victor_petrushin@ukr.net

ORCID ID: 0000-0003-2659-126X



Плоткін Юрій Романович, Берлінський університет економіки і права, кандидат технічних наук, професор, 10315, Берлін, Альт Фрідріхсфельде 60, тел. +49 (0)30 30877-2443 E-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de

Juriy Plotkin, Berlin School of Economics and Law Berlin, Ph.D., Professor, 10315 Berlin, Alt Friedrichsfelde 60, ph. +49 (0)30 30877-2443.
E-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de

ORCID ID: 0000-0001-9257-5933



Якімець Андрій Миронович, Державний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричних машин, 65044, Одеса, проспект Шевченка, 1.
E-mail: yakimets_andriy@ukr.net

Andrei Yakimets, Odessa Polytechnic State University, Ph.D, Associate Professor, Head of Electric Machines Department, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1.
E-mail: yakimets_andriy@ukr.net

ORCID ID: 0000-0002-0740-9154



Єноктаєв Ростислав Миколайович, Державний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних машин, 65044, Одеса, проспект Шевченка, 1.
E-mail: rostik-enok@ukr.net

Rostislav Yenoktaiev, Odessa Polytechnic State University, Ph.D, Associate Professor of Electric Machines Department, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1.
E-mail: rostik-enok@ukr.net

ORCID ID: 0000-0003-1577-9822



Горошко Василь Володимирович, Державний університет «Одеська політехніка», Ph. D., асистент кафедри електромеханічної інженерії. 65044, Одеса, проспект Шевченка, 1.
E-mail: vas.goroshko@gmail.com, тел. +38(063)6008004

Vasil Horoshko, Odessa Polytechnic State University, Ph. D, Assistant of Department of Electromechanical Engineering, 65044, Odessa, Shevchenko av., 1.

ORCID ID: 0000- 0002-7265-2513



Кириленко Антоніна Сергіївна, Державний університет «Одеська політехніка», магістрант кафедри електричних машин, 65044, Одеса, проспект Шевченка, 1.
E-mail: kyrylenko0511@gmail.com

Antonina Kyrylenko, Odessa Polytechnic State University, Master Student of Electric Machines Department, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1.
E-mail: kyrylenko0511@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2579-5351