

УДК 62-83: 621.313.3

Красношапка Н. Д., канд. техн. наук
Пушкар М. В.

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З МАСИВНИМИ ФЕРОМАГНІТНИМИ ЕКРАНАМИ

***Анотація.** Розглядаються питання впливу відхилення рівня напруги від номінального значення на роботу асинхронних електроприводів. Проведений порівняльний аналіз пускових режимів при зниженні та підвищенні напруги в допустимих межах. Встановлено, що використання електроприводів з асинхронними двигунами з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру має кращі енергетичні показники і спричиняє менше струмове навантаження на систему електропостачання при відхиленні напруги в межах гранично допустимих значень, ніж при застосуванні серійних асинхронних двигунів.*

***Ключові слова:** асинхронний двигун, електропривод, масивні феромагнітні екрани, пускові режими, відхилення напруги, енергетичні показники.*

Красношапка Н. Д., канд. техн. наук
Пушкар Н. В.

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С МАССИВНЫМИ ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ЭКРАНАМИ

***Аннотация.** Рассматриваются вопросы влияния отклонения уровня напряжения от номинального значения на работу асинхронных электроприводов. Проведен сравнительный анализ пусковых режимов при снижении и повышении напряжения в допустимых пределах. Установлено, что использование электроприводов с асинхронными двигателями с массивными торцевыми ферромагнитными экранами элементов роторного контура имеет лучшие энергетические показатели и оказывает меньшую токовую нагрузку на систему электроснабжения при отклонении напряжения в пределах предельно допустимых значений, чем при применении серийных асинхронных двигателей.*

***Ключевые слова:** асинхронный двигатель, электропривод, массивные ферромагнитные экраны, пусковые режимы, отклонение напряжения, энергетические показатели.*

Krasnoshapka N., PhD
Pushkar M.

IMPACT OF VOLTAGE DEVIATIONS ON ENERGY PARAMETERS OF INDUCTION MOTOR ELECTRIC DRIVES WITH MASSIVE FERROMAGNETIC SHIELDS

***Abstract.** This paper deals with the impact of voltage deviations from rated value on the performance of electric drives based on induction motors. A comparative analysis of starting modes while reducing or increasing the supply voltage within acceptable limits is carried out. It is established that the use of electric drives with induction motors with massive ferromagnetic end shields of rotor circuit elements has the best energy performance. Also it shows less current load on the electric power system at voltage deviation within the limit values comparatively with the application of serial induction motors.*

***Keywords:** induction motor, electric drive, massive ferromagnetic shields, starting modes, voltage deviations, energy parameters.*

Аналіз стану проблеми. Широкого застосування в різних сферах діяльності людини набули асинхронні електроприводи (АЕП) [1]. Найбільш масовими серед них все ще залишаються нерегульовані, внаслідок високої вартості перетворювачів частоти. Їх перевагами є висока надійність і відносно невисока вартість. Проте асинхронні двигуни (АД) чутливі до відхилення рівня напруги живлення (момент двигуна пропорційний квадрату прикладеної напруги). Діючими

стандартами встановлено нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги на затискачах приймачів електричної енергії відповідно $\pm 5\%$ та $\pm 10\%$ від номінальної напруги електричної мережі [2].

Враховуючи відносно невеликий пусковий момент АД, який для більшості машин не перевищує 1,2–2,0 номінального, пуск АЕП при значній величині постійного моменту навантаження і зниженні напруги

навіть в гранично допустимих межах, може виявитись ускладненим або неможливим. Зниження величини прикладеної напруги під час пуску двигуна призводить до зменшення величини динамічного моменту [3] і, як наслідок, збільшення часу пуску. Робота АД протягом збільшеного часу із пусковим струмом, який в 6–8 раз більше номінального, викликає значне зростання втрат в пусковому режимі та перегрів машини, якщо пуск затягується або електропривод працює із частими пусками.

В усталених режимах роботи, як відомо [4], знижений рівень напруги при незмінному моменті на валу АД призводить до збільшення струмів і прискореного старіння ізоляції внаслідок підвищення температури.

Підвищення рівня напруги вище номінального призводить до підвищення пускових струмів і моментів, зменшується коефіцієнт потужності. Збільшення пускового моменту має подвійний ефект – збільшується динамічний момент, що прискорює пуск електропривода, проте зростають динамічні удари в механічній частині під час пуску.

Навіть при номінальному рівні напруги живлення пуск електроприводів з асинхронними двигунами при незмінному статичному моменті навантаження, близькому до номінального моменту двигуна і значному сумарному моменті інерції електропривода є більш тривалим і викликає значно більші втрати енергії, порівняно із пуском цього ж двигуна без навантаження. Окрім того, із збільшенням потужності АД кратність пускового моменту відносно номінального зменшується для всіх серій загальнопромислових двигунів [5–6].

Одним із шляхів покращення пускових характеристик нерегульованих АЕП є використання АД з екрануванням фрагментів короткозамкненої роторної обмотки [7–8], що дозволяє збільшити пусковий момент машини.

Високі пускові властивості мають АЕП з механічною характеристикою «екскаваторного» типу, яка забезпечує електроприводу властивості джерела моменту в пускових режимах [9]. Механічна характеристика близька до екскаваторної може бути забезпечена в електроприводах з АД, які мають масивні

торцеві феромагнітні екрани елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором [10]. Однак недоліком двигунів такої конструкції є більш м'яка механічна характеристика в усталеному режимі роботи, тому їх доцільно використовувати в електроприводах, що працюють з частими пусками.

На початку пуску АД споживає значний реактивний струм, що може призводити до додаткового зниження рівня напруги в «слабких» системах електропостачання, ускладнюючи процес пуску. Перевагою АД з масивними торцевими феромагнітними екранами є менша величина пускового струму порівняно із серійними машинами.

Найбільш перспективним є використання екранів даної конструкції в асинхронних машинах середньої потужності, які можуть пускатись безпосередньо від мережі живлення, споживаючи при цьому значний пусковий струм.

Метою роботи є оцінка впливу відхилення напруги від номінального рівня в межах гранично допустимих значень на енергетичні показники електроприводів при використанні асинхронних двигунів з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру.

Матеріали досліджень.

Розглянемо енергетичні процеси при різних рівнях напруги в електроприводі з модифікованим АД 4А160S2У3 з масивними торцевими феромагнітними екранами фрагментів роторного контуру. Паспортні дані серійного АД: номінальна потужність 15 кВт, номінальне ковзання 2,1 %, пусковий момент 1,4 номінального, пусковий струм – семикратний.

Оптимальні розміри екранів були визначені за методикою [10], виходячи із умови створення максимального пускового моменту і ковзання при номінальному моменті навантаження не більше 4 %. Зовнішній діаметр екранів дорівнює діаметру ротора АД ($D_{\max} = 0,150$ м), внутрішній діаметр $D_{\min} = 0,135$ м, осьова товщина $l_o = 0,033$ м.

Пусковий момент і струм модифікованого АД більше свої номінальних значень в 2 та 6 разів відповідно.

Розрахунки проводились за допомогою відомої математичної моделі АД [11],

параметри роторної обмотки якої враховують витискання струму в пазах ротора при пускових режимах [10]:

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= r_1 i_{1\alpha} + L_1 \frac{di_{1\alpha}}{dt} + L_0 \frac{di'_{2\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} &= r_1 i_{1\beta} + L_1 \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_0 \frac{di'_{2\beta}}{dt}; \\ 0 &= r_2' i'_{2\alpha} + \frac{d}{dt} (L_2' i'_{2\alpha}) + p\omega L_2' i'_{2\beta} + L_0 \frac{di_{1\alpha}}{dt} + p\omega L_0 i_{1\beta}; \\ 0 &= r_2' i'_{2\beta} + \frac{d}{dt} (L_2' i'_{2\beta}) - p\omega L_2' i'_{2\alpha} + L_0 \frac{di_{1\beta}}{dt} - p\omega L_0 i_{1\alpha}; \\ M &= pL_0 (i_{1\beta} i'_{2\alpha} - i_{1\alpha} i'_{2\beta}); \\ M - M_c &= J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\}$$

де $\frac{d}{dt} (L_2' i'_{2\alpha}) = \frac{dL_2'}{dt} i'_{2\alpha} + L_2' \frac{di'_{2\alpha}}{dt}$;

$u_{1\alpha}, u_{1\beta}, i_{1\alpha}, i_{1\beta}$ – напруги і струми статора відповідно;

$i'_{2\alpha}, i'_{2\beta}$ – приведені струми ротора;

r_1, r_2' – активні опори статорного і роторного контурів відповідно;

L_1, L_2' і L_0 – власні та взаємна індуктивності статорного и роторного контурів відповідно;

M, ω – електромагнітний момент та швидкість обертання ротора двигуна;

M_c – статичний момент навантаження;

J_Σ – сумарний приведений момент інерції електропривода.

Для модифікованого АД в параметрах роторного кола також враховувався вплив масивних торцевих феромагнітних екранів внесенням в роторний контур додаткової електрорушійної сили (ЕРС), створеної спільною дією магніторушійних сил струмів роторної обмотки і вихрових струмів феромагнітних екранів. Ця еквівалентна внесена ЕРС збільшується із зростанням ковзання ротора відносно поля і обмежує струм ротора при великих ковзаннях, що приводить до обмеження величини струму, споживаного АД з мережі.

В моделі еквівалента внесена ЕРС представляється у вигляді двох складових, що є падіннями напруги на активному і індуктивному еквівалентних опорах феромагнітних екранів, включених послідовно з активним та індуктивним опорами ротора. Величини цих еквівалентних опорів істотно нелінійні і залежать від ковзання ротора відносно маг-

нітного поля статора.

Дослідження впливу відхилення напруги на характеристики АЕП проводились для електропривода з постійним статичним моментом навантаження, рівним номінальному ($M_c=M_n=const$), і сумарним моментом інерції, рівним двократному моменту інерції ротора АД ($J_\Sigma=2J_{дв}$), для чотирьох значень напруги живлення: номінальної (U_n), при нормально допустимому відхиленні $0,95U_n$ та гранично допустимому $0,9U_n$ та $1,1U_n$. Розрахунки здійснювались за допомогою наведеної математичної моделі. Результати представлені в табл. 1. Для зручності порівняння в знаменнику приведені значення для серійного АД 4А160S2У3, а в чисельнику – для модифікованого, при відповідних напругах. В табл. 1 позначені: M_n – пусковий момент АД; I_n – пусковий струм; t_n – час пуску електропривода; I_p – струм в робочій точці при даній напрузі; ΔW_n – втрати енергії за час пуску електропривода.

Таблиця 1 – Енергетичні показники АЕП при відхиленні величини напруги

Напруга	M_n , в.о.	I_n , в.о.	t_n , в.о.	I_p , в.о.	ΔW_n , кДж
U_n	2	6	1,1	1,02	27
	1,4	6,8	2	1	79
$0,95U_n$	1,9	5,8	1,3	1,08	30
	1,27	6,5	3,2	1,02	133
$0,9U_n$	1,7	5,4	1,7	1,14	37
	1,16	6,2	11	1,1	489
$1,1U_n$	2,5	6,7	0,73	0,92	22
	1,7	7,5	1	0,87	49

Проведені дослідження показують, що зниження рівня напруги відносно номінального значення негативно впливає на енергетичні показники як серійного, так і модифікованого асинхронних двигунів.

Однак в електроприводі на базі АД з масивними торцевими феромагнітними екранами фрагментів роторного контуру при пуску з моментом навантаження $M_c=M_n=const$, сумарним моментом інерції електропривода $J_\Sigma=2J_{дв}$ і напрузі $0,95U_n$ втрати пускового режиму зростають лише на 10%, а для напруги $0,9U_n$ – на 37% відносно пуску

при номінальній напрузі, тоді як для електропривода з серійним АД ці втрати збільшуються на 68% та 620% відповідно.

При збільшенні напруги до $1,1U_n$ втрати під час пуску електропривода з модифікованим АД зменшуються на 19%, а з серійним – на 38% відносно пуску при номінальній напрузі, проте втрати у випадку застосуванні модифікованого АД все одно будуть в 2,2 рази меншими, ніж із серійною машиною. При збільшенні напруги до $1,1U_n$ пускові струми зростають, але у електропривода з модифікованим АД він не перевищуватиме пускового струму серійного двигуна при номінальній напрузі.

Як відмічалось раніше, в усталеному режимі роботи електроприводи з модифікованими АД мають більш м'яку механічну характеристику, що обумовлює збільшену величину втрат ковзання. Ковзання при номінальному моменті на валу АД дорівнює 4% при номінальній напрузі і 5,3% при $0,9U_n$, в той час, коли для серійного АД ковзання змінюється в значно менших межах – від 2,1% при U_n і до 2,6% при $0,9U_n$. Таким чином, електроприводи з асинхронними двигунами з масивними феромагнітними торцевими екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором доцільно використовувати в режимах роботи з частими пусками, обмежуючи час роботи в усталеному режимі.

Висновки. При зниженні напруги в межах гранично допустимих значень електроприводи на базі асинхронних двигунів з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором забезпечують кращі енергетичні показники в пускових режимах, ніж із серійним АД при номінальній напрузі. Менша величина пускового струму модифікованого АД знижує струмове навантаження на систему електропостачання. Робота АЕП з модифікованим АД при підвищеній напрузі збільшує пусковий момент, скорочуючи час пуску і величину втрат енергії в пусковому режимі, а пусковий струм при збільшенні напруги до $1,1U_n$ не перевищує пускового струму серійного двигуна при номінальній напрузі.

Список використаної літератури

1. Mecrow, B. C. Efficiency trends in electric machines and drives [Text] / B. C. Mecrow and A. G. Jack. Article in Energy Policy – December 2008. – 20 p.
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109–97 . – [Дата введения 1999–1–01]. – Переиздание, январь 2002.
3. Leonhard, W. Control of Electrical Drives. 3th ed. [Text] W. Leonhard / Springer: Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo, 2001. – 460 p.
4. Федоров, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий [Текст] / А. А. Федоров, В. В. Каменева. – М.: Энергия, 1984. – 472 с.
5. Кравчик, А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник [Текст] / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболевская. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.
6. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
7. Вербовой, П. Ф. Классификация и анализ конструкций роторов асинхронных двигателей: Препр. [Текст] / П. Ф. Вербовой/ АН УССР. Ин-т электродинамики; № 209. – К.: 1979. – 54 с.
8. Ставинский, А. А. Короткозамкнутый ротор асинхронных двигателей с пониженной материалоемкостью и улучшенными пускорегулирующими свойствами. [Текст] / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский. Режим доступа: http://storage.library.opu.ua/online/periodic/ee_52/16.htm
9. Волков, И.В. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях. [Текст] / И. В. Волков, В. Н. Исаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 216 с.
10. Красношапка, Н. Д. Особенности определения параметров динамической модели асинхронного двигателя ферромагнитными экранами частей короткозамкнутой роторной обмотки [Текст] / Н. Д. Красношапка // 36. наук. пр. «Праці Інституту

електродинаміки НАН України». – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 1999. – Вип. Електротехніка. – С. 98–104.

11. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

Отримано 20.04.2016

References

1. Mecrow, B. C. and Jack, A.G. Efficiency trends in electric machines and drives. (2008) *Article in Energy Policy* – December, 20 p. (In English)

2. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tehnikeskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electrical energy. Compatibility of technical equipment. Power quality limits in electric power-supply systems of general purposes] : GOST 13109–97 . – [Date of validation 1999–1–01]. – republished, January 2002. (In Russian)

3. Leonhard, W. *Control of Electrical Drives*. 3th ed. (2001). Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo: Springer, 460 p. (In English)

4. Fedorov A.A., Kameneva B.B. *Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennih predpriyatiy* [Fundamentals of electric power supply of industrial enterprises], (1984), Moscow, Russian Federation, Energiya, 472 p. (In Russian)

5. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., and Sobolevskaya E.A., *Asinhronnie dvigateli serii 4A. Spravochnik* [Induction Motors Series 4A. Directory] (1982), Moscow, Russian Federation, Energoatomizdat, 504 p. (In Russian)

6. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Handbook of electric machines]: In 2 t /, ed.. Ed. IP Kopylov and BK Klovov. Part 1. (1988), Moscow, Russian Federation, Energoatomizdat, 456 p. (In Russian)

7. Verbovoy P.F. *Klassifikacija i analiz konstrukcij rotorov asinhronnyh dvigatelej*: Prepr. [Classification and analysis of the induction motor rotor constructions], AS USSR. Institute of Electrodynamics, Kyiv, 1979, 54 p. (In Russian)

8. Stavinskiy, A.A., Stavinskiy, R.A. *Korotkozamknuty rotor asinhronnih dvigateley s ponizhennoy materialoemkostyu i uluchshenyimi puskoregulirovochnymi svoystvami* [Short-shunt rotor on induction motors with low consumption of materials and improved start-adjusting properties], 2015, available at: http://storage.library.opu.ua/online/periodic/ee_52/16.htm (accessed March 16, 2015) (In Russian)

9. Volkov I.V., and Isacov V.N. *Elektroprivody so stabilizirovannym tokom v silovyh ceryah* [Electric Drives with Constant Current in Power Circuits], 1991, Radio and Communications, Moscow, Russian Federation, 216 p. (In Russian).

10. Krasnoshapka, N.D. *Osobennosti opredeleniya parametrov dinamicheskoy modeli asinhronnogo dvigatelya s ferromagnitnymi ekranami chastey korotkozamknutoy rotornoj obmotki* [Features of determination the parameters of induction motor dynamic model with ferromagnetic screens of the parts of a short-circuited rotor winding], *Zbirnyk naukovykh prac Instytutu elektrodynamicy NAN Ukrainy*, Vol. Elektrotehnika, 1999, pp. 98–104. (In Russian)

11. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin: Ucheb. dlja vuzov* [Mathematical modeling of electrical machines]. (2001), Moscow, Russian Federation, Vyshaya shkola, 327 p. (In Russian)



Красношарпа Наталія Дмитрівна, к.т.н., доц., доц. каф. автоматизації електромеханічних систем и електроприводу, НТУУ «КПІ», м. Київ, просп. Перемоги, 37, (044) 204-83-56. E-mail: ndkr@ukr.net



Пушкар Микола Васильович асист. каф. автоматизації електромеханічних систем и електроприводу, НТУУ «КПІ», 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, (044) 204-83-56.

E-mail: m.pushkar@kpi.ua