

УДК 62-83: 621.313.3

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕРЕГУЛЬОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРИ РОБОТІ З ЧАСТИМИ ПУСКАМИ

Н. Д. Красношапка, В. С. Бовкунович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: krasnat@ukr.net

Розглянуто питання покращення енергетичної ефективності нерегульованих асинхронних електроприводів при роботі з частими пусками. Для вирішення даної задачі запропоновано використовувати асинхронні двигуни спеціальної конструкції з торцевими масивними феромагнітними екранами подовжених стрижнів ротора та короткозамикаючих кілець поза робочим повітряним зазором. Розглядаються три варіанти таких конструкцій: два торцевих екрани на всі стрижні, половина стрижнів охоплюється одним торцевим екраном, а друга іншим, один торцевий екран на всі стрижні. Розглянуто питання вибору геометричних розмірів таких екранів при виконанні умови максимуму пускового моменту й накладанні обмежень на жорсткість механічної характеристики на робочій ділянці. Проведені дослідження показали збільшення величини пускового моменту при обмеженні пускового струму таких двигунів. Аналіз пускових процесів в електроприводах із запропонованими двигунами показав зменшення часу пуску, величини споживаної енергії і втрат активної потужності. Проведено порівняльний аналіз енергетичних показників пускових режимів електроприводів із запропонованими асинхронними двигунами при різних характерах навантажень. Досліджено енергетичні показники електроприводів при прямому пуску від мережі живлення та за допомогою пристроїв плавного пуску при різних характерах навантаження та величинах обмеження пускового струму.

Ключові слова: асинхронний двигун, електропривод, енергетична ефективність, феромагнітні екрани, максимальний пусковий момент.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕРЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРИ РАБОТЕ С ЧАСТЫМИ ПУСКАМИ

Н. Д. Красношапка, В. С. Бовкунович

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: krasnat@ukr.net

Рассмотрены вопросы улучшения энергетической эффективности нерегулируемых асинхронных электроприводов при работе с частыми пусками. Для решения данной задачи предложено использовать асинхронные двигатели специальной конструкции с торцевыми массивными ферромагнитными экранами удлиненных стержней ротора и короткозамыкающих колец вне рабочего воздушного зазора. Рассматриваются три варианта таких конструкций: два торцевых экрана на все стержни, половина стержней охватывается одним торцевым экраном, а вторая – другим, один торцевой экран на все стержни. Рассмотрены вопросы выбора геометрических размеров таких экранов при выполнении условия максимума пускового момента и наложении ограничений на жесткость механической характеристики на рабочем участке. Проведенные исследования показали возрастание величины пускового момента при ограничении пускового тока таких двигателей. Анализ пусковых процессов в электроприводах с предложенными двигателями показал сокращение времени пуска, величины потребляемой энергии и потерь активной мощности. Проведен сравнительный анализ энергетических показателей электроприводов с предложенными асинхронными двигателями при различных характерах нагрузок. Исследованы энергетические показатели электроприводов при прямом пуске от питающей сети и с помощью устройств плавного пуска при различных характерах нагрузок и величинах ограничения пускового тока.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, электропривод, энергетическая эффективность, ферромагнитные экраны, максимальный пусковой момент.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Не менше 60 % усієї генерованої електроенергії перетворюється в механічну роботу, проте значну кількість серед усіх використовуваних електроприводів все ще складають нерегульовані асинхронні. Таке поширення обумовлене високою надійністю та відносно низькою вартістю асинхронних електродвигунів (АД) порівняно з іншими типами електричних машин. Одним із головних недоліків АД є відносно невеликий пусковий момент при значній величині пускового струму. Застосування регульованих асинхронних електроприводів із перетворювачами частоти дозволяє уникнути даних недоліків і організувати енергоефективний пуск АД при різних характерах навантажень.

Однак висока вартість даного обладнання обмежує їх використання у випадках, коли немає потреби в регульованні швидкості обертання двигуна. Використання пристроїв плавного пуску з обмеженням величини пускових струмів супроводжується зменшенням пускового моменту й, при складних умовах пуску (момент навантаження на валу АД під час пуску близький до номінального та значний сумарний приведений момент інерції електропривода), може бути неможливим або призводити до значних втрат енергії внаслідок затягування часу пуску й, як наслідок, тривалої роботи АД із значними величинами струмів.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми є за-

стосування АД із підвищеним пусковим моментом при обмеженні пускових струмів. Використання ефекту витиснення струму в стрижнях короткозамкненої роторної обмотки з підвищенням частоти роторних струмів є класичним способом покращення пускових властивостей АД. Найбільше практичне застосування отримали глибокопазні й двоклітинні двигуни [1, 2]. Покращені пускові властивості мають і інші типи двигунів із частотно-залежними параметрами роторного контуру, зокрема двигуни з масивними [3, 4] й двошаровими [5, 6] роторами, з індукційними опорами в колі ротора [7, 8], з феромагнітним екрануванням елементів короткозамкненої роторної обмотки [9–11].

Покращення пускових характеристик АД при збереженні достатньо високих енергетичних показників у зоні малих ковзань можна досягти застосуванням комбінованих конструкцій роторів [3].

Однак дані конструкції роторів АД повною мірою не забезпечують одночасного виконання вимог до характеристик двигуна в пускових і номінальних режимах роботи.

Ще одним напрямом покращення пускових властивостей АД з короткозамкненою роторною обмоткою із збереженням високих енергетичних показників у зоні номінальних режимів роботи є конструкції роторів з феромагнітним екрануванням елементів роторної обмотки поза робочим повітряним зазором [9, 10]. Характерною особливістю цих конструкцій роторів АД є введення в роторний контур додаткових активно-індуктивних опорів, величина яких залежить від величини й частоти струму ротора.

Проте екранування лише короткозамикаючих кілець у машинах загальнопромислової частоти 50 Гц не дає значного ефекту, а застосування магнітом'якої гільзи [9, 10], яка екранує разом із кільцями, ще й подовжені частини стрижнів роторної обмотки, виявилось ефективним для авіаційних електричних машин при частоті струму 400 Гц, але в загальнопромислових АД ефект є незначним.

У загальнопромислових АД, які працюють при частоті змінного струму 50 Гц, ефективними виявляються варіанти з масивними феромагнітними екранами. Для вирішення даної задачі можливо використання модифікованого АД із масивними торцевими феромагнітними екранами подовжених частин стрижнів та короткозамикаючих кілець роторної обмотки поза робочим повітряним зазором (рис. 1). Такі екрани в пускових режимах вносять у роторний контур додаткові частотно-залежні опори, які дозволяють збільшити величину моменту при зменшенні величини струму. У [12] розглянуто питання щодо застосування двигунів із двома такими екранами, які охоплюють усі стрижні роторної обмотки, що дозволяє реалізувати механічну характеристику модифікованого АД «екскаваторного» типу для покращення пускових характеристик асинхронних електроприводів. Геометричні розміри запропонованих екранів елементів роторного контуру визначаються за методикою, викладеною в [13]. Наприклад, для АД 4A160S2Y3 потужністю 15 кВт зовнішній діаметр екранів приймається рівним діаметру ротора ($D_{max}=0,150$ м). Забезпечити механічну

характеристику «екскаваторного» типу за даною методикою можливо при використанні екранів з осью товщиною $l_o = 0,033$ м та внутрішнім діаметром $D_{min}=0,135$ м. Механічні характеристики модифікованого двигуна (1) та серійного (2) наведено на рис. 2.

Проте вибір такої конструкції масивних торцевих екранів призводить до зростання втрат в установлених режимах роботи. Для АД 4A160S2Y3 ковзання при номінальному моменті навантаження зростає майже удвічі (до 4 % з 2,1 % для серійного двигуна) при забезпеченні пускового моменту на рівні двократного номінального та обмеженні струму на рівні шестикратного при відповідних показниках серійного двигуна на рівні 1,4 номінального моменту й семикратного номінального струму.

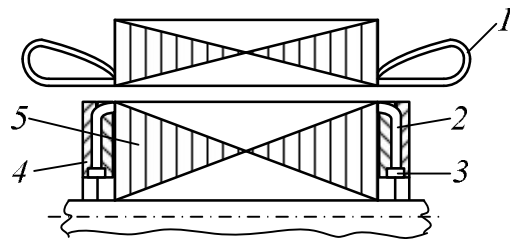


Рисунок 1 – Ескіз конструкції АД із двосторонніми феромагнітними екранами фрагментів роторної обмотки: 1 – трифазна статорна обмотка; 2 – подовжені частини стрижнів ротора; 3 – короткозамикаюче кільце; 4 – феромагнітні дискові екрани; 5 – ротор АД

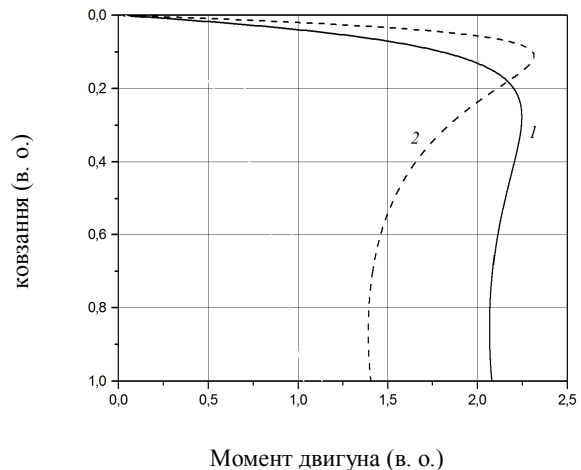


Рисунок 2 – Механічні характеристики серійного та модифікованого АД

Метою даного дослідження є розробка рекомендацій щодо застосування різних конструкцій масивних торцевих феромагнітних екранів, які здатні покращити пускові властивості АД при більших вимогах до жорсткості механічної характеристики на робочій ділянці.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Розглянемо можливі конструкції двигунів із масивними торцевими феромагнітними екранами подовжених стрижнів роторної обмотки та короткозамикаючих кілець поза робочим повітряним зазором, які б дозволили покращити енергетичні показники проце-

су пуску електропривода при зменшенні величини додаткових втрат у номінальному режимі.

Порівняємо три можливі конструкції модифікованого АД:

1) два масивних торцевих феромагнітних екрана на всі стрижні роторної обмотки (конструкція 1) (рис. 1) [12];

2) два масивних торцевих феромагнітних екрана, які охоплюють стрижні через один (один стрижень буде охоплений екраном із правої сторони, а наступний – з лівої, тобто на кожному стрижні екран буде тільки з однієї сторони (конструкція 2);

3) один масивний торцевий феромагнітний екран на всі стрижні роторної обмотки (конструкція 3).

Розглянемо реалізацію даних конструктивних рішень на базі асинхронного двигуна 4A160S2Y3 з наступними паспортними даними: номінальна потужність 15 кВт, номінальне ковзання 2,1 %, пусковий момент 1,4 від номінального, пусковий струм – семикратний. Двигун такої потужності можна пускати при прямому підключенні до мережі живлення. При визначенні оптимальних розмірів екранів за методикою [13] будемо виходити із забезпечення номінального моменту при ковзанні не більше 3 % та створення максимального пускового моменту.

Для зменшення втрат енергії в усталеному режимі відійдемо від умови формування механічної характеристики «екскаваторного» типу, виконання якої виявляється можливим, коли номінальний момент досягається при ковзанні близько 4 %. Введемо обмеження, що момент АД, не менший номінального, повинен бути при ковзанні $s_1 = 0,03$. Тоді за вказаною методикою отримаємо наступні геометричні розміри екранів:

– конструкція 1: осьова товщина $l_o = 0,019$ м, внутрішній діаметр $D_{min} = 0,140$ м;

– конструкція 2: осьова товщина $l_o = 0,012$ м, внутрішній діаметр $D_{min} = 0,09$ м;

– конструкція 3: осьова товщина $l_o = 0,018$ м, внутрішній діаметр $D_{min} = 0,107$ м.

Отримані величини пускових моментів і струмів для всіх трьох варіантів та базового (серійного) АД наведено в табл. 1. Аналіз результатів показує, що застосування АД запропонованих конструкції при забезпеченні ковзання не більше 3 % при номінальному моменті призводить до зменшення розмірів феромагнітних екранів порівняно з випадком формування характеристики «екскаваторного» типу при $s_1 = 0,04$ і, відповідно, зниження їх впливу на пускові властивості електроприводу.

Таблиця 1 – Пускові характеристики АД

Тип АД	Пусковий момент, в. о.	Пусковий струм, в. о.
серійний	1,4	6,80
конструкція 1	1,83	6,42
конструкція 2	1,79	6,09
конструкція 3	1,82	6,09

Механічні характеристики даних двигунів зображено на рис. 3, а електромеханічні – на рис. 4. На рисунках позначено характеристики двигунів: 1 – серійного; 2 – з двома екранами на всі стрижні; 3 – з двома екранами через стрижень; 4 – з одним екраном на всі стрижні.

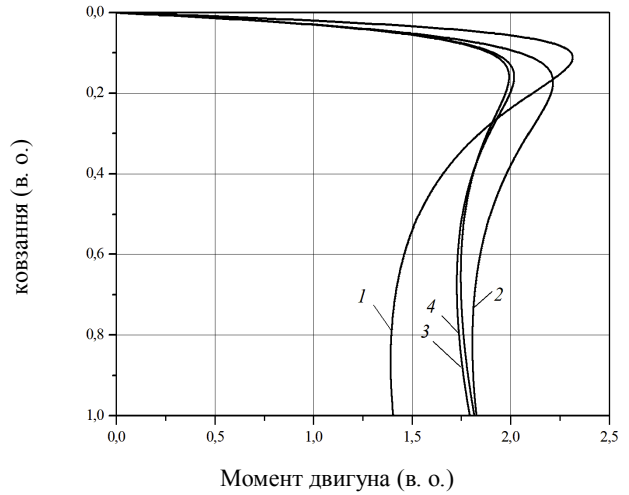


Рисунок 3 – Механічні характеристики модифікованих АД

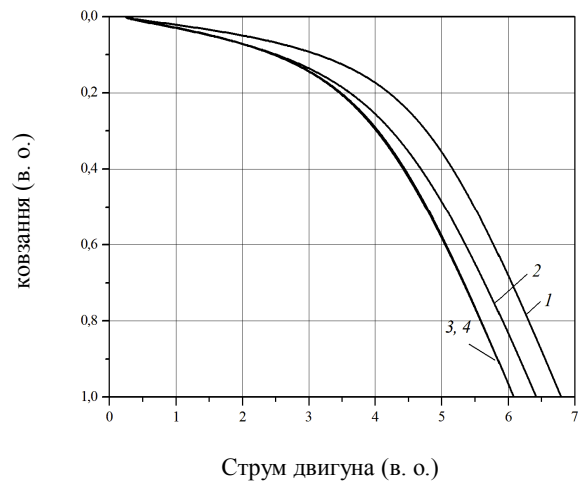


Рисунок 4 – Електромеханічні характеристики модифікованих АД

Як показує аналіз залежностей, конструкції 2 і 3 виявляються дуже схожими за своїми властивостями, а конструкція 1 відрізняється від них більшим пусковим струмом і максимальним моментом, проте пусковий момент всіх трьох варіантів майже однаковий.

Для визначення величини втрат в асинхронних електроприводах при використанні наведених двигунів скористаємось відомою моделлю АД в $\alpha\beta$ -координатах (1) з [14], відмінністю якої є змінні активний опір та індуктивність роторного контуру, які враховують витискання струму в стрижнях білячої клітки під час пуску, вплив масивних феромагнітних екранів та зміну опору внаслідок подовження стрижнів.

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= r_1 i_{1\alpha} + L_1 \frac{di_{1\alpha}}{dt} + L_0 \frac{di'_{2\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} &= r_1 i_{1\beta} + L_1 \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_0 \frac{di'_{2\beta}}{dt}; \\ 0 &= r'_2 i'_{2\alpha} + \frac{d}{dt}(L'_2 i'_{2\alpha}) + p\omega L'_2 i'_{2\beta} + L_0 \frac{di_{1\alpha}}{dt} + p\omega L_0 i_{1\beta}; \\ 0 &= r'_2 i'_{2\beta} + \frac{d}{dt}(L'_2 i'_{2\beta}) - p\omega L'_2 i'_{2\alpha} + L_0 \frac{di_{1\beta}}{dt} - p\omega L_0 i_{1\alpha}; \\ M &= pL_0 (i_{1\beta} i'_{2\alpha} - i_{1\alpha} i'_{2\beta}); \\ M - M_c &= J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\} (1)$$

де $\frac{d}{dt}(L'_2 i'_2) = \frac{dL'_2}{dt} i'_2 + L'_2 \frac{di'_2}{dt}$; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$, $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – напруги й струми статора відповідно; $i'_{2\alpha}$, $i'_{2\beta}$ – приведені струми ротора; r_1 , r'_2 – активні опори статорного й роторного контурів відповідно; L_1 , L'_2 , L_0 – власні та взаємна індуктивності статорного й роторного контурів відповідно; M , ω – електромагнітний момент та швидкість обертання ротора двигуна; M_c – статичний момент навантаження; J_Σ – сумарний приведений момент інерції електропривода; p – кількість пар полюсів.

Витискання струму в стрижнях роторної обмотки враховувалось за допомогою емпіричного рівняння

$$r'_2 = r'_{2n} (1 + 0,25s^2); \quad (2)$$

$$x'_2 = x'_{2n} (1 - 0,75\sqrt{s}), \quad (3)$$

де r'_{2n} і x'_{2n} – паспортні значення приведених активних та реактивного опорів; s – ковзання.

Особливості електромагнітних процесів, що протікають у роторному контурі з екрануванням частин короткозамкненої обмотки, обумовлені появою в роторному контурі додаткової електрорушійної сили (ЕРС), створеної спільною дією магніторушійних сил (МРС) струмів роторної обмотки й вихрових струмів феромагнітних екранів. Дана ЕРС виявляється пропорційною струму роторного контуру й за законом електромагнітної індукції направлена проти причини, що її викликала. Ця еквівалентна внесена ЕРС збільшується із зростанням ковзання ротора щодо поля й істотно обмежує струм ротора при великих ковзаннях, що призводить до обмеження величини струму, споживаного АД з мережі.

Еквівалентну внесену ЕРС E_e можна надати у вигляді двох складових, що є падіннями напруги на активному r_e та індуктивному x_e еквівалентних опорах феромагнітних екранів [4]:

$$- \dot{E}_e = r_e \dot{I}_2 + jx_e \dot{I}_2. \quad (4)$$

Таким чином, поглинанням енергії феромагнітними екранами можна врахувати в математичній моделі, якщо в контур ротора ввести додатковий активно-індуктивний опір, падіння напруги на якому від струму роторного контуру еквівалентно наведеної у ньому ЕРС E_e . Величини активного (r'_e) і індуктивного (x'_e) еквівалентних опорів істотно

нелінійні й залежать від ковзання ротора відносно магнітного поля статора.

Алгоритм визначення еквівалентних внесених опорів масивних феромагнітних екранів частин роторної обмотки наведено в роботі [13]. Розрахунок базується на визначенні величин активної й реактивної складових електромагнітної потужності, що поглинаються масивними феромагнітними елементами роторного контуру.

Масивний феромагнітний поділяється на тонкі шари товщиною Δ , на кожному з яких визначаються активні й реактивні складові вектора Умова–Пойнтінга, який визначає потужність та напрям потоку електромагнітної енергії, що проходить через одиницю поверхні, перпендикулярної напрямку руху потоку енергії. Результируючі значення потужностей, що поглинаються масивними екранами, визначаються як сума елементарних складових цих потужностей уздовж радіального розміру екранів.

Величини опорів можуть бути визначені за співвідношеннями [13]:

$$\left. \begin{aligned} r'_e &= 8\alpha_p \sigma \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_0}{2\gamma}} \frac{m_1 (k_{obl} w_1)^2 \Delta}{\pi} \sum_{i=1}^n \left(K_1 \sqrt{\frac{\mu_{si} s}{D_i^2}} \right); \\ x'_e &= 8\alpha_q \sigma \sqrt{\frac{\mu_0 \omega_0}{2\gamma}} \frac{m_1 (k_{obl} w_1)^2 \Delta}{\pi} \sum_{i=1}^n \left(K_2 \sqrt{\frac{\mu_{si} s}{D_i^2}} \right), \end{aligned} \right\} (5)$$

де α_p , α_q – поправочні коефіцієнти, які враховують змінність магнітної проникності в товщині екранів; σ – коефіцієнт внеску опору від екранування короткозамикаючих кілець; μ_0 – магнітна постійна; γ – електрична провідність сталі; m_1 – кількість фаз статора; k_{obl} – обмотковий коефіцієнт статора; w_1 – кількість витків фази статора; μ_{si} – відносна магнітна проникність на межі i -го тонкого шару; D_i – діаметр струмового шару; K_1 , K_2 – коефіцієнти нелінійно залежать від геометричних розмірів екранів та еквівалентної глибини проникнення електромагнітної хвилі у феромагнітний масив [12].

Енергетичні показники пускових режимів залежать від умов пуску електропривода: моменту навантаження на валу двигуна та сумарного приведенного моменту інерції електропривода.

У табл. 2 надано результати проведених досліджень для одного з найскладніших з енергетичної точки зору режимів пуску – прямий пуск при постійному моменті навантаження на валу двигуна, що дорівнює номінальному, і сумарному приведенному моменту інерції електропривода, який дорівнює чотирикратному моменту інерції ротора двигуна 4A160S2Y3.

До таблиці введені позначення: t_p – час пуску електропривода; W_p – сумарні втрати енергії за час пуску; ΔP_c – середні втрати активної потужності за час пуску; K_W – відношення втрат за час пуску електропривода з двигуном даної конструкції до відповідних втрат при використанні серійного АД.

Таблиця 2 – Дослідження режиму прямого пуску при постійному моменті опору навантаження

Тип АД	$t_p, \text{с}$	$W_p, \text{кДж}$	$\Delta P_c, \text{кВт}$	$K_W, \text{в.о.}$
серійний	3,52	151,8	43,1	1
конструкція 1	2,20	68,2	31,1	0,45
конструкція 2	2,76	72,5	26,3	0,48
конструкція 3	2,56	70,7	27,6	0,47

Таким чином, використання модифікованих двигунів дозволяє зменшити як втрати енергії на 52–55 %, так і сам час пуску. Середні втрати активної потужності зменшуються на 28–39 % порівняно із серійним АД.

Розглянемо режим прямого пуску даних АД при вентиляторному моменті опору навантаження (момент опору навантаження пропорційний квадрату швидкості обертання двигуна) та сумарному приведеному моменту інерції електропривода, що дорівнює чотирикратному моменту інерції ротора двигуна. Результати досліджень приведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Дослідження режиму прямого пуску при вентиляторному моменті опору навантаження

Тип АД	$t_p, \text{с}$	$W_p, \text{кДж}$	$\Delta P_c, \text{кВт}$	$K_W, \text{в.о.}$
серійний	2,6	49,45	19,02	1
конструкція 1	1,07	27,84	26,02	0,56
конструкція 2	1,28	29,6	23,16	0,6
конструкція 3	1,17	27,36	23,34	0,55

У даному випадку також спостерігається покращення енергетичних показників порівняно з електроприводом із серійним АД: зменшення споживання електричної енергії на 34–40 % і скорочення часу пуску у два й більше разів.

Часті пуски із струмами на рівні 180 А призводять до суттєвого навантаження на мережу живлення, тому розглянемо роботу даних двигунів у складі електроприводів із пристроями плавного пуску, які є тиристорними регуляторами напруги, що обмежують під час пуску величину струму АД [15, 16]. Для порівняння розглянемо роботу електропривода при сумарному приведеному моменті інерції на валу АД, який дорівнює чотирикратному номінальному моменту інерції ротора двигуна, й постійному моменті опору навантаження, що дорівнює номінальному моменту двигуна.

Аналіз показав, що пуск модифікованих двигунів при такому моменті навантаження можливий при

обмеженні струму на рівні п'ятикратного номінального (I_n). Пуск серійного АД при обмеженні струму на цьому рівні за даних умов неможливий. Результати досліджень пускових характеристик модифікованих двигунів наведено в табл. 4. Так само, як і в табл. 2, коефіцієнт K_W враховує відношення втрат енергії конкретного варіанту до втрат серійного двигуна при прямому пуску.

Таблиця 4 – Дослідження режиму плавного пуску при постійному моменті опору навантаження

Тип АД	$t_p, \text{с}$	$W_p, \text{кДж}$	$\Delta P_c, \text{кВт}$	$K_W, \text{в.о.}$
Струм обмеження $5I_n$				
серійний	пуск неможливий			
конструкція 1	4,17	153,3	36,76	1
конструкція 2	2,95	98,46	33,38	0,65
конструкція 3	2,86	94,73	33,12	0,62

З отриманих даних можна зробити висновок, що при обмеженні струму середні втрати активної потужності за час пуску для кожної з конструкцій майже не змінилися, проте порівняно з режимом прямого пуску вони дещо зросли (приблизно на 20 %), що можна пояснити збільшенням часу пуску внаслідок зменшення динамічного моменту. При обмеженні струму на рівні $5I_n$ конструкція 1 має час пуску на 18 % більший, ніж при прямому пуску серійного АД, проте конструкції 2 і 3 забезпечують кращі показники часу, ніж прямий пуск серійної машини, а втрати енергії зменшуються на 35–38 %.

Проаналізуємо пускові процеси в даному електроприводі при вентиляторному моменті опору навантаження.

Дослідження проводились для обмеження струму на рівні $3I_n$, $4I_n$ та $5I_n$. Результати зведено до табл. 5.

Аналіз результатів показує, що в даному випадку застосування серійного АД призводить до зростання втрат енергії порівняно з прямим пуском (на 87, 14 та 3 %) та суттєвого збільшення часу пуску (в 4,45; 2,64 та 2,29 разів) відповідно до рівня обмеження струму.

Застосування модифікованих двигунів дозволяє зменшити втрати енергії навіть при обмеженні струму на рівні $3I_n$ без суттєвого збільшення часу перехідного процесу порівняно з прямим пуском серійного АД.

При обмеженні величини пускового струму на рівні $3I_n$ втрати енергії зменшуються на 18, 24 та 23 % для конструкцій 1, 2 та 3 відповідно.

При обмеженні величини струму на рівні $4I_n$ ці показники дорівнюють 32, 33 та 32 % відповідно, а при $5I_n$ – 35 та 34 %.

Таблиця 5 – Дослідження режиму плавного пуску при вентиляторному моменті опору навантаження

Тип АД	t_p, c	$W_p, кДж$	$\Delta P_c, кВт$	$K_W, в.о.$
Струм обмеження $3I_n$				
серійний	11,58	92,53	7,99	1,87
конструкція 1	3,08	40,36	13,1	0,82
конструкція 2	3,11	37,81	12,16	0,76
конструкція 3	3,34	38,03	11,39	0,77
Струм обмеження $4I_n$				
серійний	6,87	56,62	8,24	1,14
конструкція 1	1,68	33,75	20,06	0,68
конструкція 2	1,96	33,1	16,89	0,67
конструкція 3	2,21	33,44	15,13	0,68
Струм обмеження $5I_n$				
серійний	5,95	50,9	8,55	1,03
конструкція 1	1,28	32,37	25,29	0,65
конструкція 2	1,64	32,54	19,84	0,66
конструкція 3	1,9	32,87	17,3	0,66

Середні втрати активної потужності в процесі пуску у модифікованих двигунів також зменшуються порівняно з процесом прямого пуску, причому чим менша величина обмеження струму в процесі пуску, тим менші середні втрати активної потужності.

ВИСНОВКИ. Аналіз отриманих результатів показує, що при застосуванні в електроприводах, які працюють із частими пусками, модифікованих АД із частотно-залежними параметрами, споживання електричної енергії в процесі прямого пуску зменшується на 52–55 % при постійному моменті навантаження та на 40–45 % при вентиляторному.

Збільшення величини пускового моменту модифікованих двигунів розширює можливості застосування в електроприводі пристроїв плавного пуску, особливо при незмінних моментах навантаження, близьких до номінального, коли неможливий пуск серійного АД з обмеженням величини струму.

Найкращі, приблизно однакові, енергетичні показники мають двигуни з двома торцевими екранами, які охоплюють стрижні через один із кожної сторони, та з одним торцевим масивним феромагнітним екраном на всі стрижні, тому з урахуванням того, що конструктивно простішою є модифікація двигуна з одним торцевим екраном на всі стрижні роторної обмотки, можна рекомендувати використовувати в електроприводах даного типу АД конструкції 3.

ЛІТЕРАТУРА

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: в 2 т. – М.: МЭИ, 2006. – Т. 1. – 652 с.
2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 349 с.
3. Вербовой П.Ф. Классификация и анализ конструкций роторов асинхронных двигателей. – К.: АН УССР. Ин-т электродинамики, 1979. – Вып. 209. – 54 с.
4. Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором. – К.: Наукова думка, 1984. – 168 с.
5. Лисицкий Е.Л., Олейников А.М. К расчету электромагнитной мощности асинхронного двигателя с двухслойным ротором // Электричество. – 1982. – Вып. 2. – С. 62–64.
6. Могильников В.С., Олейников А.М., Стрельников А.Н. Асинхронные двигатели с двухслойным ротором и их применение. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 120 с.
7. Киричек Г.М. Индукционные сопротивления в цепи ротора двухскоростного асинхронного двигателя // Техн. электродинамика. – 1979. – Вып. 1. – С. 52–56.
8. Розов Ю.М., Тигунов А.П. Методические рекомендации по расчету асинхронного двигателя с индукционным роторным сопротивлением. – К.: Наукова думка, 1981. – 52 с.
9. Асинхронный двигатель: А.с. 1275671 СССР, МКИ Н 02 К 17/16 / М.М. Красношапка, Д.М. Красношапка, Н.И. Устименко. – № 3826526/24–07; заявлено 19.12.84; опубл. 07.12.1986, Бюл. № 45. – 2 с.
10. Устименко Н.И. Экспериментальные исследования асинхронных двигателей с ферромагнитной гильзой на роторе // Повышение эффективности и надежности систем авиационного оборудования. – К.: КВВАИУ, 1985. – С. 26–28.
11. Ставинский А.А., Ставинский Р.А. Короткозамкнутый ротор асинхронных двигателей с пониженной материалоемкостью и улучшенными пускорегулирующими свойствами. – Режим доступа: http://storage.library.opu.ua/online/periodic/ee_52/16.htm
12. Красношапка Н.Д. Пусковые режимы асинхронных электроприводов с свойствами джера момента и с системами ограничения пусковых струмів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – К., 2006. – 21 с.
13. Красношапка Н.Д. Особенности определения параметров динамической модели асинхронного двигателя ферромагнитными экранами частей короткозамкнутой роторной обмотки // 3б. наук. пр. «Праці Інституту електродинаміки НАН України». – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 1999. – Вып. «Електротехніка». – С. 98–104.
14. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
15. http://www.emersonindustrial.com/en-EN/documentcenter/ControlTechniques/Brochures/CTA/ FLI-DGIS_Analog_1107.pdf
16. http://www.tek-el.ru/static/docs/schneider_electric/soft_start_lecture.pdf

THE INCREASING OF THE POWER EFFICIENCY OF UNREGULATED ASYNCHRONOUS DRIVE UNDER FREQUENT STARTS

N. Krasnoshapka, V. Bovkunovich

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: krasnat@ukr.net

The problem of increasing the power efficiency of unregulated asynchronous drive under frequent starts is considered. To solve this problem the implementation of induction motors of special construction with frontal massive ferromagnetic screens of elongated rotor rods and short-circuited circles outside the air gap is proposed. The three variants of design are taken under consideration: two frontal screens on all the rods, one half of the rods has one frontal screen and another part has the second screen, one frontal screen for all the rods. The ways of election of the geometrical parameters of such screens in terms of maximal starting torque under the saturation of starting current is observed. The analysis of starting transients in electrical drives with the proposed induction motors has revealed the decreasing the starting time, the value of consumed energy and the active power losses. A comparative analysis of the energy performance of starting modes of electric drives with the proposed IM for different characters load is studied. The energy performance drives for direct start from the power supply and using devices of smooth start with different characters load and inrush current limit values is researched.

Key words: induction motor, electric drive, power efficiency, ferromagnetic screens, maximal starting torque.

REFERENCES

1. Ivanov-Smolensky, A.V. (2006), *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines], MPEI, Moscow. (in Russian)
2. Voldek, A.I. and Popov, V.V. (2010), *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka: uchebnyk dlya vuzov* [Electrical machines. AC machines: a textbook for high schools], Piter, Saint Petersburg. (in Russian)
3. Verbovoy, P.F. (1979), *Klassifikatsiya i analiz konstruktzii rotorov asinhronnykh dvigateley* [Classification and analysis of the induction motor rotor constructions], AS USSR, Institute of Electrodynamics, Kyiv. (in Russian)
4. Licshenko, A.I. and Lesnik, V.A. (1984), *Asinhronnye mashiny s massivnym ferromagnitnym rotorom* [Asynchronous machines with massive ferromagnetic rotor], Naukova dumka, Kyiv. (in Russian)
5. Lisitsky, E.L. and Oleynikov, A.M. (1982), “Calculation of electromagnetic power of induction motor with two-layer rotor”, *Elektrichestvo*, Vol. 2, pp. 62–64. (in Russian)
6. Mogilnikov, V.S., Oleynikov, A.M. and Strelnikov, A.N. (1983), *Asinhronnye dvigateli s dnuhsloynym rotorom i ih primenenie* [Induction motors with two-layer rotor and their use], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
7. Kirichek, G.M. (1979), “Induction resistances in the rotor circuit of the two-speed induction motor”, *Tekhnichna elektrodinamika*, Vol. 1, pp. 52–56. (in Russian)
8. Rozov, Y.M. and Tiginov, A.P. (1981), *Metodicheskie rekomendatsii po raschetu asinhronnogo dvigatelya s induktsionnym rotornym soprotivleniem* [Methodical recommendations on the calculation of the asynchronous motor rotor resistance], Naukova dumka, Kyiv. (in Russian)
9. Krasnoshapka, M.M., Krasnoshapka, D.M. and Ustimenko, N.I. (1986), Induction motor: A.c. 1275671 USSR, MKI H 02 K 17/16, no. 3826526/24-07; declared 19.12.84; Published. 07.12.1986, Bulletin no. 45.
10. Ustimenko, N.I. (1985), “Experimental investigation of induction motors with ferromagnetic sleeve on the rotor”, *Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti sistem aviatsionnogo oborudovaniya*, KVVAIU, Kyiv, pp. 26–28. (in Russian)
11. Stavinskiy, A.A. and Stavinskiy, R.A. (2015), “Short-shunt rotor on induction motors with low consumption of materials and improved start-adjusting properties”, available at: http://storage.library.opu.ua/online/periodic/ee_52/16.htm (accessed March 16, 2015). (in Russian)
12. Krasnoshapka, N.D. (2006), “Starting regimes of asynchronous electric drive with properties of moment source and with the systems of starting currents limitation”, Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, 05.09.03, Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine. (in Ukrainian)
13. Krasnoshapka, N.D. (1999), “Features of determination of parameters of induction motor dynamic model with ferromagnetic screens of the parts of a short-circuited rotor winding”, *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy, iss. Elektrotehnika*, pp. 98–104. (in Russian)
14. Kopylov, I.P. (2001), *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin: ucheb. dlya vuzov* [Mathematical modeling of electrical machines], Vysshaya shkola, Moscow. (in Russian)
15. http://www.emersonindustrial.com/en-EN/documentcenter/ControlTechniques/Brochures/CTA/FLIDGIS_Analog_1107.pdf (accessed March 10, 2015)
16. http://www.tek-el.ru/static/docs/schneider_electric/soft_start_lecture.pdf (accessed March 1, 2015)

Стаття надійшла 5.06.2015.