

ПУСКОВІ РЕЖИМИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З УРАХУВАННЯМ ОПОРУ ЛІНІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розглядаються питання впливу активного опору лінії системи електропостачання на пускові характеристики асинхронних електроприводів. В розподільчих мережах низької напруги великої протяжності напруга у кінцевих споживачів може зменшуватись через значне падіння її в лінії електропередачі. Це падіння напруги буде залежати від величини струму в лінії. Пуск нерегульованих асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором характеризується відносно невеликою величиною пускового моменту за великих значень пускового струму, що може призводити до збільшення падіння напруги в лінії електропередачі під час пуску та, як наслідок, зменшення пускового моменту, який пропорційний квадрату прикладеної напруги. Таким чином, режим роботи електропривода з частими пусками буде негативно впливати на роботу інших споживачів електричної енергії. Проведено порівняння пускових характеристик за використання серійного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та модифікованого з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором, що забезпечує формування механічної характеристики «екскаваторного» типу. Досліджено вплив активного опору лінії електропередачі на величини пускових моментів та струмів для електроприводів з обома типами двигунів. Встановлено, що модифікований асинхронний двигун за рахунок більшої величини пускового моменту дозволяє здійснити пуск електропривода зі статичним моментом, рівним номінальному моменту двигуна, при досліджуваній зміні активного опору лінії до 1,5 відносно активного опору статорної обмотки двигуна, тоді як в електроприводі з серійним двигуном пусковий момент стає менше номінального при додатковому опорі більше 0,8 відносно активного опору статорної обмотки. Водночас більші значення пускового моменту забезпечують електроприводу з модифікованим асинхронним двигуном значно менші час пуску та споживання активної енергії, ніж у разі застосування серійної машини з однаковими умовами пуску. Таким чином, електропривод з асинхронним двигуном з масивними торцевими феромагнітними екранами фрагментів роторного контуру поза робочим повітряним зазором має суттєві переваги перед серійним двигуном у випадку роботи з частими пусками.

Ключові слова: асинхронний електропривод, пускові характеристики, масивний торцевий феромагнітний екран.

Вступ

Асинхронні електроприводи мають широке застосування в різноманітних галузях. Їх характерними особливостями є значна залежність електромагнітного моменту від величини напруги статора та відносно невелика величина пускового моменту за значної величини пускового струму. В умовах значної довжини лінії низької напруги, до якої підключений асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, значну роль починає грати опір лінії електропередачі, який призводить до додаткового зниження напруги [1], [2]. Це падіння напруги буде залежати від величини струму в лінії електропостачання, впливаючи на характеристики електропривода. Великі значення пускових струмів призводять до ще більшого падіння напруги на опорі лінії і зниження напруги у кінцевих споживачів.

Досить гостро це питання постає для нерегульованих асинхронних електроприводів, які працюють з частими пусками, у разі живлення від мереж зі значним падінням напруги в лінії електропостачання. Застосування частотного пуску асинхронного електропривода дозволяє вирішити ці

проблеми, але, враховуючи високу вартість перетворювача частоти, застосування таких електроприводів у випадках, коли відсутня потреба в регулюванні швидкості обертання, найчастіше є економічно недоцільним. Обмежити величини пускових струмів в асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором можливо за допомогою пристроїв плавного пуску, які зменшують напругу живлення асинхронного двигуна для обмеження величини струмів на заданому рівні [3]. Такі пристрої значно дешевші ніж перетворювачі частоти, проте вони також мають свої недоліки. Головний недолік — зниження величини напруги живлення призводить до зменшення і так невеликого моменту асинхронної машини, який пропорційний квадрату напруги. Таким чином, часто виявляється, що суттєве обмеження величини пускових струмів унеможливорює пуск машини під навантаженням.

Вирішенню цієї проблеми може сприяти застосування асинхронних двигунів спеціальних конструкцій [4] зі збільшеною величиною пускового моменту за обмеження величини пускового струму. Такі властивості має асинхронний двигун з короткозамкненим ротором з масивними торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором. Вибором відповідних геометричних розмірів таких екранів можна сформувати механічну характеристику «екскаваторного» типу з обмеженням величини пускових струмів [5]. Позаяк збільшення довжини стрижня ротора поза робочим повітряним зазором та поглинання енергії екранами призводять до зменшення жорсткості механічних характеристик, то такі електроприводи рекомендується застосовувати насамперед у випадку режиму роботи з частими пусками.

Метою роботи є порівняння пускових характеристики електроприводів з серійним та модифікованим з масивними феромагнітними торцевими екранами асинхронними двигунами з короткозамкненими роторами за різних значень активних опорів лінії електропередачі.

Результати дослідження

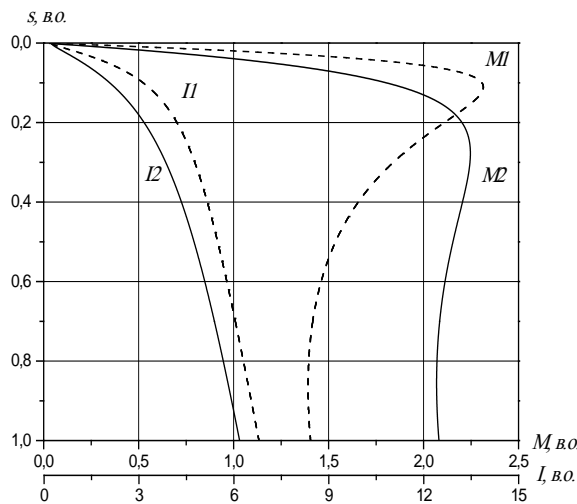


Рис. 1. Механічні та електромеханічні характеристики:
 - - - - серійного асинхронного двигуна 4A160S2Y3;
 — модифікованого двигуна

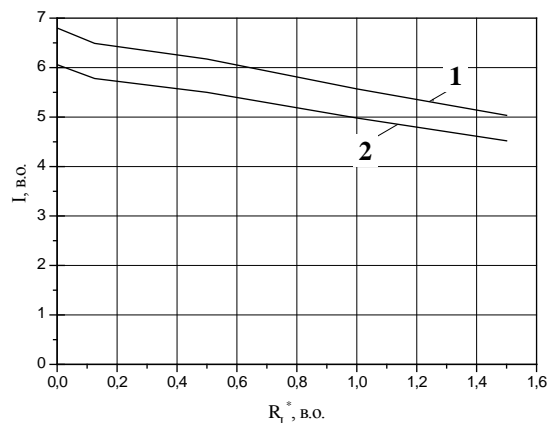


Рис. 2. Залежність пускового струму від величини додаткового активного опору лінії

Проведено порівняння пускових характеристик нерегульованих електроприводів з серійним асинхронним двигуном 4A160S2Y3 потужністю 15 кВт та модифікованим на його базі двигуном з масивними торцевими феромагнітними екранами, які забезпечують формування механічної характеристики екскаваторного типу (рис. 1). На рисунку пунктирними лініями показані механічна та електромеханічна характеристики серійного двигуна у відносних одиницях, а суцільними — модифікованого двигуна з масивним торцевими феромагнітними екранами елементів роторного контуру поза робочим повітряним зазором.

Для аналізу впливу активного опору лінії електропостачання в математичну модель вводився додатковий активний опір, послідовно з'єднаний з опором обмотки статора двигуна. Значення цього опору R_L варіювались від 0 (додатковий опір не враховувався) до значення $1,5R_S$, де R_S — активний опір обмотки статора.

Значення пускових струмів (рис. 2) і моментів (рис. 3) розраховувались на підставі схеми заміщення двигунів. Індексом 1 позначені характеристики, які відносяться до серійного асинхронного двигуна, а 2 — модифікованого. Активний опір системи електропостачання наведений у відносних одиницях $R_L^* = R_L/R_S$.

Як видно з графіків, в обох випадках зі збільшенням активного опору лінії електропостачання струм і момент зменшуються. Причому у модифікованого двигуна момент зменшується дещо скоріше, ніж у серійного. Це пояснюється впливом параметрів са-

мих екранів, які вносять еквівалентний додатковий опір, причому формування механічної характеристики заданого вигляду забезпечується конкретними розмірами екранів, які розраховуються для визначених умов. В цьому випадку екрани розраховані для формування характеристик за номінальних параметрів мережі. Однак, не зважаючи на вказані недоліки, асинхронний двигун з масивними торцевими екранами при додатковому опорі лінії $1,5R_s$ забезпечує пусковий момент на рівні 1,2 номінального, що складає 0,86 пускового моменту серійного двигуна на природній характеристиці. Тоді як останній за тих же умов має момент менше 0,8 номінального.

Також досліджено зміни споживаної активної потужності та часу пуску електропривода за наявності навантаження на валу електропривода, яке створювало сумарний приведений момент інерції, рівний подвійному моменту інерції двигуна, та незалежний від швидкості статичний момент, рівний номінальному моменту двигуна (рис. 4 та рис. 5, відповідно). Індексом 1 позначені характеристики, які відносяться до серійного асинхронного двигуна, а 2 — модифікованого.

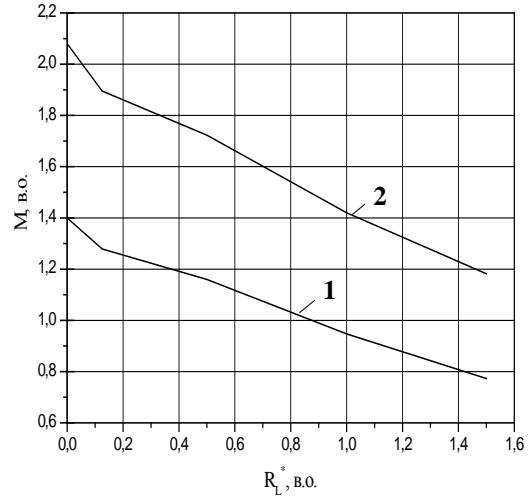


Рис. 3. Залежність пускового моменту від величини додаткового активного опору лінії

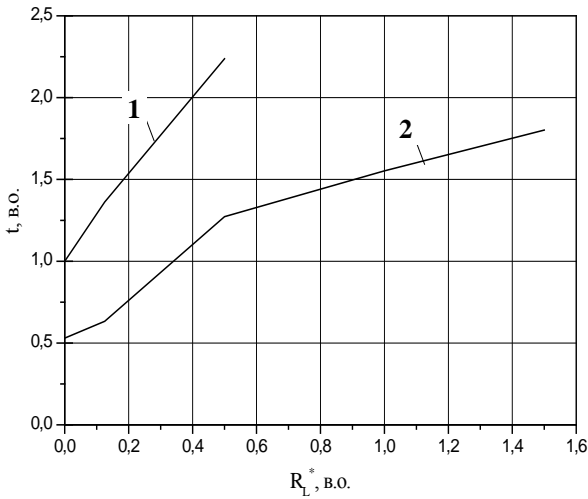


Рис. 4. Залежність часу пуску електропривода від величини додаткового активного опору лінії

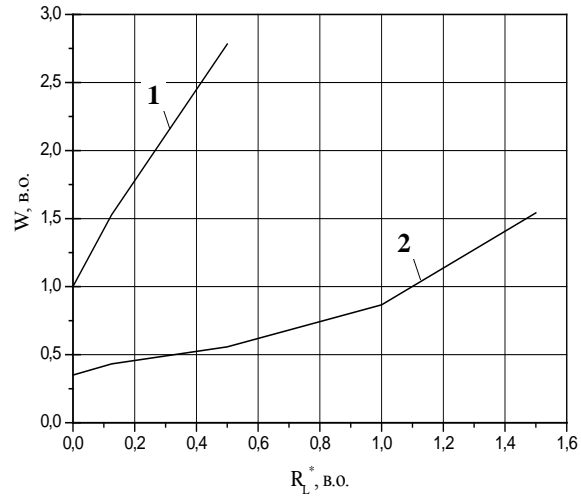


Рис. 5. Залежність споживання активної енергії під час пуску від величини додаткового активного опору лінії

Розрахунки проводились за допомогою відомої математичної моделі [5].

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

де $\frac{d}{dt}(L'_2 i'_2) = \frac{dL'_2}{dt} i'_2 + L'_2 \frac{di'_2}{dt}$; $u_{1\omega}$, $u_{1\beta}$, $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ — напруги і струми статора, відповідно; $i'_{2\alpha}$, $i'_{2\beta}$ — приве-

дені струми ротора; $r_{1\Sigma}$ — сумарний активний опір обмотки статора та лінії електропередачі, r'_2 — активний опір роторного контуру; L_1 , L'_2 і L_0 — власні та взаємна індуктивності статорного і 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 асинхронного двигуна в параметрах роторного кола також враховувався вплив масивних торцевих феромагнітних екранів введенням додаткових еквівалентних активного і індуктивного опорів, які залежать від величини ковзання [6].

Як відомо з основного рівняння руху електропривода, зменшення моменту двигуна M за незмінних значень статичного моменту M_c та моменту інерції J_Σ призводить до збільшення часу пуску електропривода. Позаяк розрахунки проводилися для фіксованих значень опору лінії електропостачання 0; $0,1R_S$; $0,5R_S$; $1,0R_S$ та $1,5R_S$, то з рис. 3 видно, що для електропривода з серійним асинхронним двигуном час пуску стрімко зростає зі збільшенням опору лінії і, коли $R_L = 0,5R_S$, перевищує час пуску у разі номінальних параметрів живлення приблизно в 2,25 рази. Разом з тим, коли опори лінії становлять $1,0R_S$ та $1,5R_S$, пуск за заданих умов взагалі стає неможливим, тому що з опором лінії більше $0,8R_S$ пусковий момент двигуна менше номінального. При цьому споживання активної потужності при $R_L = 0,5R_S$ перевищує показник номінального режиму приблизно 2,75 рази.

Модифікований асинхронний двигун забезпечує пуск електропривода за всіх розглянутих значень додаткового активного опору лінії. З $R_L = 1,5R_S$ час пуску зростає в 1,75, а споживання активної потужності в 1,5 рази порівняно з пуском електропривода із серійним асинхронним двигуном за відсутності додаткового опору лінії електропостачання.

Висновки

Встановлено, що застосування модифікованого двигуна з феромагнітними екранами елементів роторного контуру за рахунок формування механічної характеристики «екскаваторного» типу забезпечує достатню величину пускового моменту, а також зменшує час пуску та споживання активної енергії за більших значень додаткових опорів лінії ніж в електроприводі із серійним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Y. Bokovi, A. A. Salami, K. Mawugno Kodjo, K. A. Dotche, and K. Bedja, "Comparative Study of the Voltage Drops Estimation on Electrical Distribution grid: Case study of the Togolese Company of Electricity and Energy grid," in 2019 *IEEE PES/IAS PowerAfrica*, 2019, pp. 255-260. <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2019.8928838>.
- [2] H. Beyhan, M. Yalçın, and A. F. Kocamaz, "Matching Voltage Drop And Power Losses With GIS In Middle Voltage Electric Distribution Network In Diyarbakır," in 2019 *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 2019, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/IDAP.2019.8875899>.
- [3] J S. Pandey, S. Bahadure, K. Kanakgiri, and N. M. Singh, "Two-phase soft start control of three-phase induction motor," 2016 *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2016, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICPES.2016.7584127>.
- [4] F. Rincos, E. Stringari, and C. Gaudeaux, "Benefits and Drawbacks of low Inrush Large Induction Squirrel Cage Electric Motors," in 2018 *IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, 2018, pp. 257-268. <https://doi.org/10.1109/PCIC31437.2018.9080483>.
- [5] Н. Д. Красношарпа, і М. В. Пушкар, «Вплив відхилення напруги на енергетичні показники електроприводів з асинхронними двигунами з масивними феромагнітними екранами.» *Електротехнічні комплекси та комп'ютерні системи*, № 22 (98), с. 129-133, 2016.
- [6] Н. Д. Красношарпа, «Особенности определения параметров динамической модели асинхронного двигателя феромагнитными экранами частей короткозамкнутой роторной обмотки.» *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, вип. Електротехніка, с. 98-104, 1999.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.12.2021

Красношарпа Наталія Дмитрівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: krasnat@ukr.net ;

Пушкар Микола Васильович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу.

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

N. D. Krasnoshapka¹
M. V. Pushkar¹

Starting Modes of Asynchronous Electric Drives Taking into Account the Resistance of the Line of the Power Supply System

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

The issues of the influence of the active resistance of the power supply line on the starting characteristics of asynchronous electric drives are considered. In long-distance low-voltage distribution networks, the voltage at the end consumers may decrease due to a significant drop in the power line. This voltage drop will depend on the amount of current in the line. Starting unregulated induction motors with short-circuited rotor is characterized by a relatively small value of starting torque at high starting current values, which will increase the voltage drop in the transmission line during start-up and, consequently, reduce starting torque proportional to the square of applied voltage. Thus, the mode of operation of the electric drive with frequent starts will negatively affect the operation of other consumers of electricity. A comparison of starting characteristics using a serial asynchronous motor with a short-circuited rotor and modified with massive end ferromagnetic screens of rotor circuit elements outside the working air gap, which provides the formation of mechanical characteristics of the “excavator” type. The influence of the active resistance of the transmission line on the values of starting torques and currents for electric drives with both types of motors is investigated. It is established that the modified asynchronous motor due to the larger value of the starting torque allows to start the electric drive at static torque equal to the nominal torque of the motor at the studied change of line resistance to 1.5 relative to the active resistance of the motor stator winding, while in electric drive serial motor starting torque becomes less than the nominal with additional resistances greater than 0.8 relative to the active resistance of the stator winding. In turn, higher values of starting torque provide the electric drive with the modified asynchronous motor much less time of start and consumption of active energy, than at application of the serial car with identical conditions of start. Thus, the electric drive with an induction motor with massive end ferromagnetic screens of fragments of the rotor circuit outside the working air gap has significant advantages over the serial motor in the case of operation with frequent starts.

Keywords: asynchronous electric drive, starting characteristics, massive end ferromagnetic shields.

Krasnoshapka Nataliia D. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drives, e-mail: krasnat@ukr.net ;

Pushkar Mykola V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drives