

## СТРУКТУРНО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Дмитро Гречин, к. т. н., Іван Дробот,  
Степан Хімка, к. т. н., Маркіян Гошко, к. т. н.  
Львівський національний аграрний університет,  
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна,  
e-mail: hrechynd@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2019.23.075>

### Гречин Д., Дробот І., Хімка С., Гошко М. Структурно-математичне моделювання різних способів пуску асинхронного двигуна

У праці визначено проблему частих пусків електродвигунів у механізмах, які працюють у повторно-короткочасних режимах, а також енергозбереження під час пуску. Найчисленніше використання у виробничих процесах притаманне асинхронному двигуну з короткозамкненим ротором. Здійснений аналіз публікацій показав доцільність проведення досліджень в окресленому напрямі, для забезпечення кращих техніко-економічних показників, а також використання регульованого електроприводу, застосування перетворювачів між мережею та електродвигуном тощо. Завдання дослідження – за допомогою структурно-математичної моделі асинхронного двигуна в середовищі MATLAB / Simulink, а також додаткового обладнання дослідити різні способи пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. У роботі побудовано структурно-математичну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, а також додаткового обладнання: перемикач за схемою «зірка-трикутник», пристрою плавного пуску, перетворювача частоти. Проведено моделювання чотирьох способів пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором під навантаженням: прямий, з перемикач за схемою «зірка-трикутник», з використанням пристрою плавного пуску, з перетворювачем частоти. Перші два способи пуску забезпечують просту й дешеву схему керування, а за допомогою технічних засобів, таких як пристрій плавного пуску та перетворювач частоти, можна отримати регульований та контрольований запуск асинхронного двигуна, а саме такі параметри: регулювати час пуску, вводити обмеження, забезпечити регулювання чи домогтися певного значення моменту, пускового струму тощо. За допомогою перетворювача частоти можна отримати регульовану швидкість обертання асинхронного двигуна з різними законами керування.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, пуск, структурно-математична модель, перехідні процеси.

### Hrechyn D., Drobot I., Khimka S., Hoshko M. Structural-mathematical modeling of the different methods of initiating an induction motor

The work determines problem of frequent starting of electric motors in the mechanisms, operating in repeated-short-term modes, as well as energy saving during start-up. In production processes, the most extensive use is inherent in an induction motor with a short-circuited rotor. The analysis of publications has shown the feasibility of conducting research in the above-mentioned direction to provide the best technical and economic indicators, as well as the use of a regulated electric drive, the use of converters between the network and the electric motor, etc. The research objective is to investigate the various methods of starting of an induction motor with the help of a structural and mathematical model of the induction motor in MATLAB / Simulink environment, as well as additional equipment. The purpose of the work is to investigate the various methods of starting an induction motor with a short-circuited rotor, using the constructed models. The research described a constructed structural-mathematical model of induction motor with a short-circuited rotor, as well as additional equipment: switching by the «star-triangle» scheme, the device of smooth start-up, frequency converter. The article describes simulation of four methods of starting of an induction motor with a short-circuited rotor under load, particularly a direct one, with switching according to the «star-triangle» scheme, using a soft start device, with a frequency converter. The first two start-up methods provide a simple and inexpensive control scheme, and by means of technical means such as a soft start device and frequency converter, an adjustable and controlled start of the induction motor can be obtained, namely, the startup, introduction of restrictions, regulation or provision of a certain value of moment, starting current.

**Key words:** induction motor, start, structural and mathematical model, transient processes.

**Постановка проблеми.** За умов швидкого розвитку інформаційних систем, а водночас і засобів виробництва розширюються можливості підвищення ефективності виробничих процесів.

Енергозбереження в електроприводі має дуже важливе значення, оскільки електропривод є основним споживачем електроенергії. А тому режими його роботи, типи електроприводу, спо-

соби та межі регулювання мають вирішальне значення з погляду енергозбереження.

Стрімкий розвиток силової електроніки та мікропроцесорної техніки розширює функціональні можливості електроприводу, а також його економічність. Завдяки цьому підвищується ефективність різних технологічних процесів.

Технологічні процеси задають умови та режими роботи електроприводу. У великій кількості технологічних процесів електропривод працює у повторно-короткочасних режимах роботи. Це призводить до частих пусків електродвигунів. Найчастіше використовується асинхронний трифазний електродвигун із короткозамкненим ротором. Найпоширенішим є його прямиий пуск. При цьому двигун споживає струм у 5 – 7 разів більший від номінального. Це призводить до перевантажень та перегріву самого двигуна, перевантаження мережі та комутаційно-захисного обладнання пусковими струмами, коливанням напруги у мережі. Тому питання пуску асинхронного двигуна не втрачають своєї актуальності.

Сучасні напівпровідникові перетворювачі усувають низку недоліків. Але вони мають високу вартість. А тому доцільно провести дослідження різних способів пуску, зокрема оцінити технологічні показники пуску асинхронного двигуна, такі як пусковий струм, момент, час пуску тощо.

Один із найзручніших способів дослідження – це моделювання.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Основна частина електроприводів, зокрема в сільському господарстві, нерегульовані. Найчастіше перетворення електричної енергії на механічну відбувається за допомогою асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Для забезпечення високого рівня енергозбереження в електроприводі існує кілька шляхів [4; 6–12; 13–16]:

1) під час проектування це вдосконалення алгоритму вибору електродвигуна для конкретного виду обладнання. Електродвигуни зі заниженою потужністю перевантажуються та швидко виходять з ладу, а електродвигуни зі завищеною потужністю працюють недовантаженими, неефективно перетворюють електричну енергію на механічну, наявні високі втрати енергії в самому електродвигуні та мережі живлення, низький коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності. Допущена помилка у виборі електродвигуна призводить до високих перевитрат і погіршення економічності нерегульованого масового електроприводу;

2) заміна електродвигунів енергозберігаючими двигунами. Ці двигуни мають поліпшені номінальні дані, такі як коефіцієнт корисної дії та

коефіцієнт потужності, за рахунок збільшеної маси активних матеріалів (заліза та міді);

3) забезпечення роботи електроприводу в раціональних режимах. Цей спосіб реалізується за рахунок створення та використання вже існуючих технічних засобів, які мінімізують шкідливий вплив відхилення навантажень від номінальних, а також енергетичних показників. Це є обладнання, яке вмикається між мережею та електродвигуном. За допомогою цього обладнання, окрім енергозбереження, здійснюють регулювання режимів роботи двигуна, таких як пуск, гальмування, швидкість та момент, обмежують струм, забезпечують захист та діагностику. За допомогою такого обладнання підвищують загальний технічний рівень електроприводу в цілому, а відповідно і його надійність;

4) уникання роботи електроприводу в режимі неробочого ходу, тобто роботи електродвигуна при від'єднаному механізмі або механізмі, який не виконує роботи;

5) заміна нерегульованого електроприводу регульованим. Загалом є два способи зменшення енергоспоживання: перший – зменшення втрат енергії у силових перетворювачах електроприводу, а другий – за рахунок регулювання швидкості обертання електродвигуна регулювати технологічні показники робочої машини в технологічному процесі. Перший випадок передбачає відмову від додаткових механічних перетворювачів та регуляторів швидкості обертання. У другому випадку економії енергії домагаються за рахунок технологічного процесу, що обслуговується електроприводом, економія здебільшого в кілька разів перевищує власне споживання електроенергії електроприводом.

Енергозбереження покращується також за рахунок підвищення якості ремонту електродвигунів, використання перемикачів обмоток двигунів зі схеми «трикутника» на «зірку» у незавантажених двигунів, використання синхронних двигунів тощо.

Отже, у механізмах із частими пусками також є необхідність удосконалення електроприводів як із погляду енергозбереження, так і технологічного процесу та керованості.

**Постановка завдання.** Завданням дослідження є побудова структурно-математичної моделі асинхронного двигуна, а також додаткового обладнання для різних способів пуску в середовищі MATLAB/Simulink. Мета роботи – за допомогою побудованих моделей дослідити різні способи пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

**Виклад основного матеріалу.** В електроприводах з асинхронними двигунами динамічні процеси описуються нелінійними рівняннями високого порядку [1–5; 7; 8; 13; 14; 15–20]. Для цього можна використати спрощений опис, а саме математичну модель асинхронного двигуна:

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{(\omega_{0el} - \omega_{del})U_\phi}{\omega_{0el}R'_{2\Sigma}(pT_e + 1)}; \\ \omega_\delta &= \frac{M_\delta - M_c}{pJ_\Sigma} \\ M_\delta &= \frac{3 p_n \Gamma_p U_\phi}{\omega_{0el}} \\ \omega_\delta &= \frac{\omega_{del}}{p_n}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $I_p$  – значення струму ротора, приведене до обмотки статора, А;  $\omega_{0el} = 2\pi f_1$  – кутова електрична частота обертання напруги мережі, рад/с;  $\omega_{del} = p_n \omega_\delta$  – кутова електрична швидкість обертання ротора асинхронного двигуна, рад/с;

$U_\phi$  – фазна напруга живлення, В;  $R'_{2\Sigma}$  – сумарний приведений активний опір кола ротора асинхронного двигуна, Ом;  $T_e = \frac{1}{\omega_{0el} s_K}$  – електромагнітна стала асинхронного двигуна, с;  $\omega_\delta$  – поточне значення швидкості асинхронного двигуна, рад/с;  $M_\delta$  – момент, який розвиває двигун, Н·м;  $M_c$  – момент навантаження, Н·м;  $p_n$  – кількість пар полюсів двигуна;  $s_K = \frac{R'_{2\Sigma}}{x_K}$  – критичне ковзання двигуна.

Відповідно до системи рівнянь (1) на рис. 1 зображена структурна схема.

Вхідними величинами структурної схеми є: фазна напруга статора  $U_\phi$ , частота напруги живлення статора  $f_1$  і момент статичного навантаження  $M_c$ . Вихідні величини – приведений струм ротора  $I_p$ , електромагнітний момент  $M_\delta$  та кутова швидкість асинхронного двигуна  $\omega_\delta$ .

Структурно-математичну модель з підставленими значеннями в середовищі MATLAB/Simulink зображено на рис. 2.

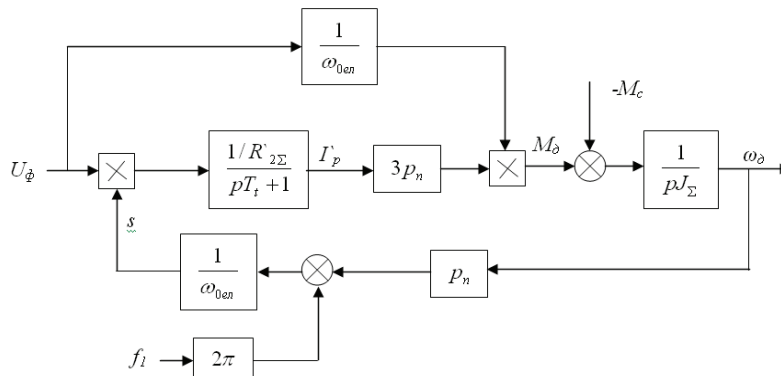


Рис. 1. Структурно-математична модель асинхронного двигуна

Fig. 1. Structural-mathematical model of an induction motor

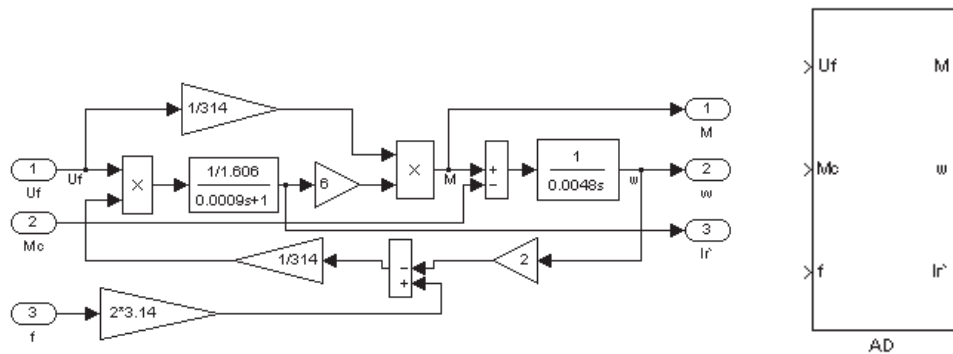
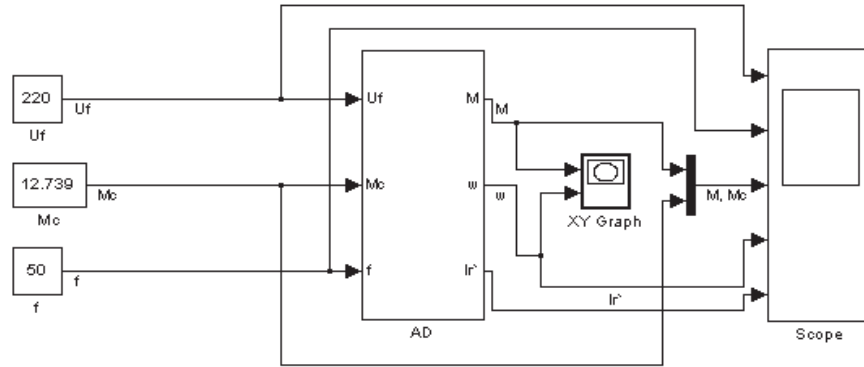


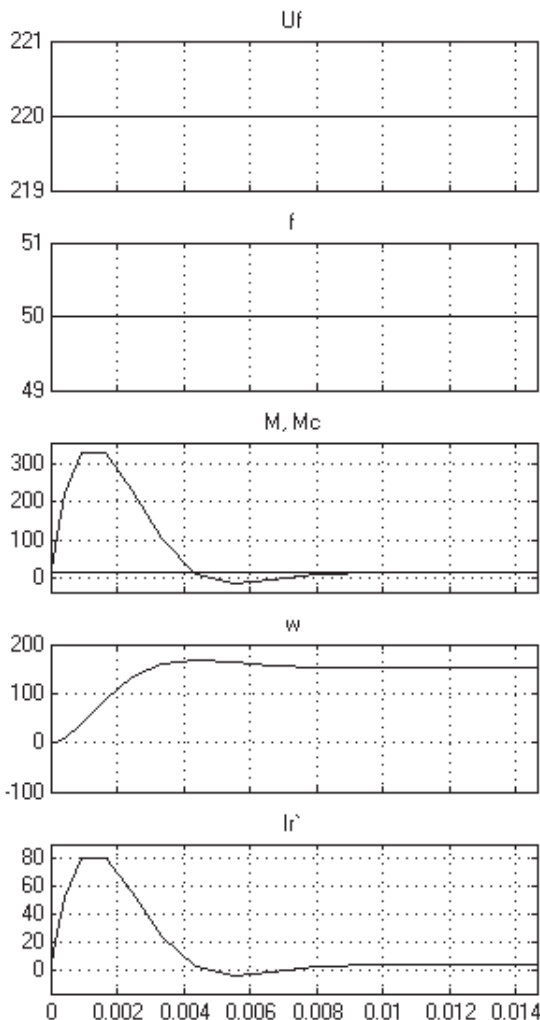
Рис. 2. Структурно-математична модель асинхронного двигуна з підставленими значеннями, представлена у вигляді підсистеми

Fig. 2. The structural and mathematical model of an induction motor with subtracted values is presented as a subsystem



**Рис. 3.** Структурно-математична модель схеми для дослідження прямого пуску асинхронного двигуна

**Fig. 3.** Structural-mathematical model of the scheme for study of direct start of an induction motor



**Рис. 4.** Графічні залежності перехідних процесів при прямому пуску асинхронного двигуна

**Fig. 4.** Graphic dependencies of transients during direct start of an induction motor

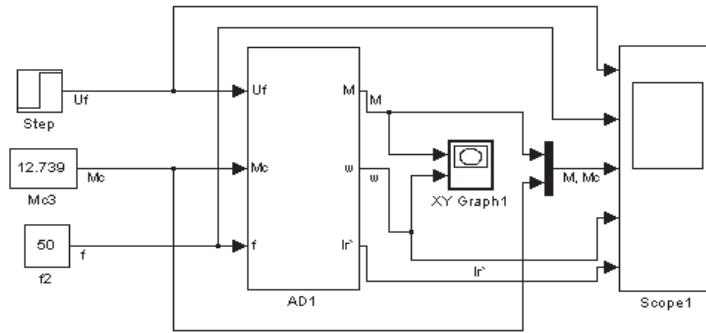
*Прямий пуск.* Схема моделі при прямому пуску подана на рис. 3. На схемі зображено структурно-математичну модель асинхронного двигуна AD, джерело напруги  $U_f$ , В, джерело частоти напруги живлення  $f$ , Гц, момент статичного навантаження  $M_c$ , осцилоскоп, на якому контролюють вхідні величини, а також вихідні, момент, який розвиває двигун  $M$ , Н·м, кутову швидкість обертання двигуна  $w$ , рад/с, та струм ротора  $I_r$ , А. Пуск здійснюємо при номінальному навантаженні для всіх випадків. Час моделювання становить 1,5 с. У результаті моделювання отримано графічні залежності перехідних процесів (рис. 4).

Напруга, частота та момент статичного навантаження мають номінальні значення, а з отриманих графічних залежностей перехідних процесів видно, що пусковий момент сягає значення понад 300 Нм, присутнє певне перевищення швидкості асинхронного двигуна. При цьому струм ротора сягає 80 А. Швидкість досягає усталеного значення практично миттєво, за 0,009 с.

*Перемикання «зірка-трикутник».* Схема моделі зображена на рис. 5. Запуск передбачає зміну напруги живлення від меншої у  $\sqrt{3}$  від номінальної напруги, з подальшим перемиканням на номінальну напругу живлення. Це перемикання реалізоване за допомогою блока Step, відбувається перемикання напруги з 127 В до 220 В.

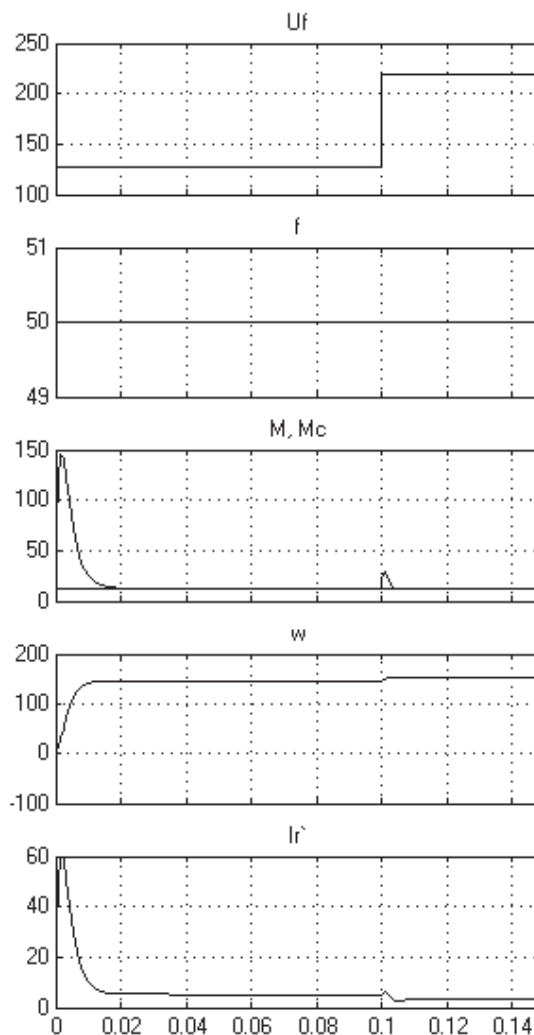
Отримані графічні залежності перехідних процесів зображені на рис. 6.

Пуск асинхронного двигуна за цією схемою передбачає зменшення пускового моменту порівняно з прямим пуском. Під час пуску момент сягає значення близько 150 Нм, струм ротора – близько 60 А. При досягненні швидкості, близької до робочої, відбувається перемикання на номінальну напругу живлення. При цьому збільшуються момент і швидкість обертання, з подальшим досягненням усталених значень.



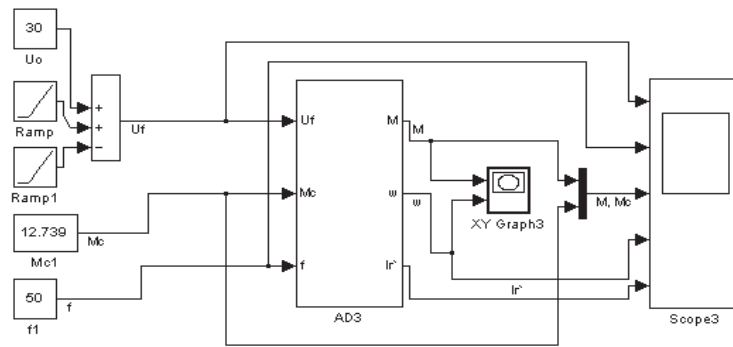
**Рис. 5.** Структурно-математична модель схеми для дослідження пуску асинхронного двигуна за схемою «зірка-трикутник»

**Fig. 5.** Structural-mathematical model of the scheme for study of the start of an induction motor according to the «star-triangle» scheme



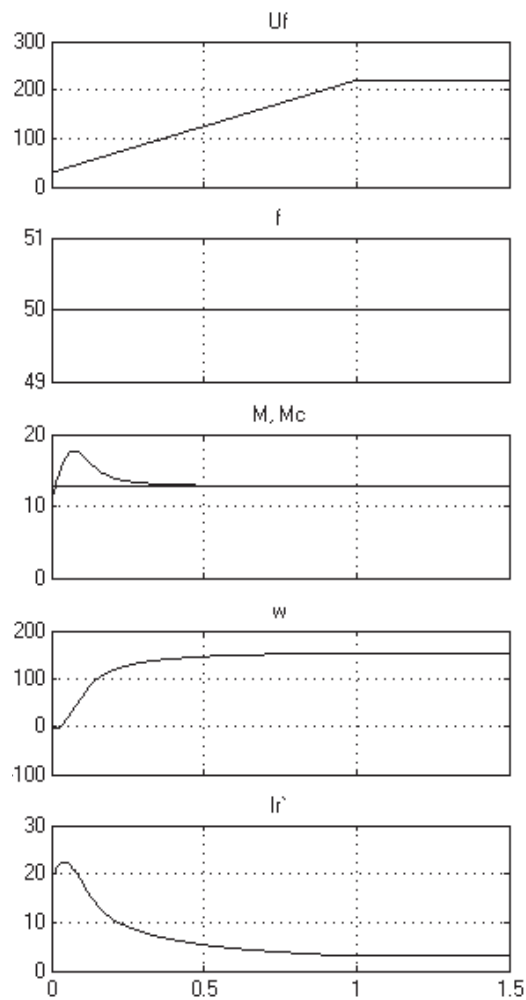
**Рис. 6.** Графічні залежності перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна при перемиканні за схемою «зірка-трикутник»

**Fig. 6.** Graphic dependencies of transient processes while starting an induction motor under switching according to the «star-triangle» scheme



**Рис. 7.** Структурно-математична модель схеми для дослідження пуску асинхронного двигуна за допомогою пристрою плавного пуску

**Fig. 7.** Structural-mathematical model of the circuit for study of the start of an induction motor, using a soft start device



**Рис. 8.** Графічні залежності перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна за допомогою пристрою плавного пуску

**Fig. 8.** Graphic dependencies of transient processes while starting an induction motor with a soft start device

Пуск за допомогою пристрою плавного пуску. Пристрій плавного пуску наближено змодельований за допомогою таких елементів: блока Constant –  $U_0$ , двох елементів Ramp та суматора (див. рис. 7).

Отримані графічні залежності перехідних процесів зображено на рис. 8.

З графіка зміни напруги видно, що напруга змінюється від 30 В до 220 В протягом однієї

секунди. Напруга починається не з нуля, оскільки в моделі момент навантаження активний і, щоб двигун не розганявся у протилежному напрямі, напруга починається не з нуля, а з 30 В. Пусковий момент становить близько 17 Нм, струм ротора трохи більший за 20 А, що є суттєво меншим від пуску за схемою перемикачання «зірка-трикутник» і ще меншим від прямого пуску. Швидкість досягає усталеного значення близько 0,8 с.

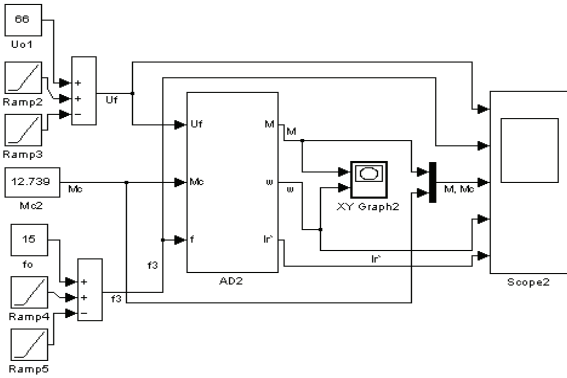


Рис. 9. Структурно-математична модель схеми для дослідження пуску асинхронного двигуна за допомогою перетворювача частоти

Fig. 9. Structural-mathematical model of the scheme for study of the start of an induction motor, using a frequency converter

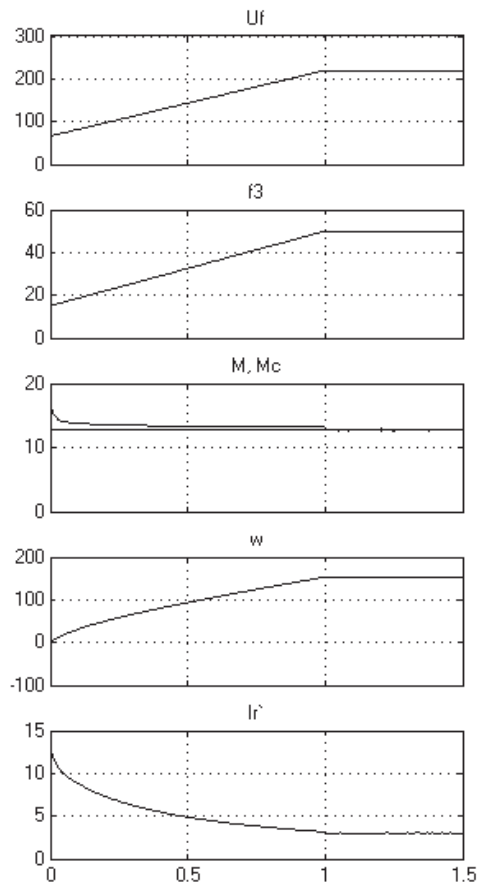
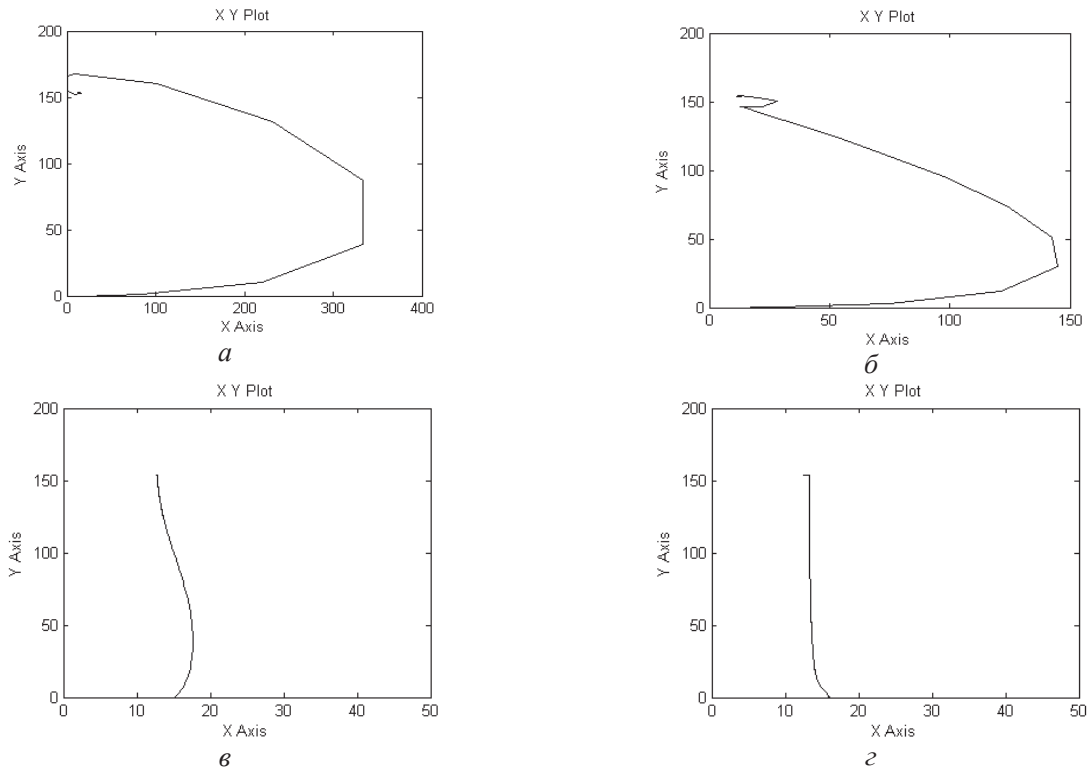


Рис. 10. Графічні залежності перехідних процесів при пуску асинхронного двигуна за допомогою перетворювача частоти

Fig. 10. Graphic dependencies of transient processes while starting an induction motor, using a frequency converter



**Рис. 11.** Графічні залежності механічних характеристик асинхронного двигуна під час пуску: а) прямого; б) перемикання «зірка-трикутник»; в) з використанням пристрою плавного пуску; г) із перетворювачем частоти

**Fig. 11.** Charts of the mechanical characteristics of an induction motor during start-up: а) direct; б) switching the "star-triangle"; в) using a soft start device; г) with a frequency converter

Пуск за допомогою перетворювача частоти. Пуск за допомогою перетворювача частоти реалізований аналогічно до пуску з пристроєм плавного пуску асинхронного двигуна (див. рис. 9).

Окремо здійснюється регулювання напруги живлення та регулювання частоти мережі при збереженні сталого співвідношенні  $U/f = 220/50 = 4,4 = \text{const}$ . Сигнал напруги і частоти змінюється за заданою інтенсивністю протягом однієї секунди (див. рис. 10). Напруга при цьому змінюється від 66 до 220 В, а частота – від 15 до 50 Гц. Пусковий момент сягає значення близько 17 Нм, а струм ротора – близько 12 А. Швидкість досягає усталеного значення за одну секунду.

На рис. 11 зображено механічні характеристики  $\omega(M)$  асинхронного двигуна під час різних способів пуску ( $\omega$ , рад/с;  $M$ , Н·м): а – прямий пуск, б – пуск із перемиканням «зірка-трикутник», в – із пристроєм плавного пуску, г – плавний пуск із перетворювачем частоти.

Із розглянутих рисунків видно, що найбільший момент асинхронний двигун із короткозамкненим ротором розвиває під час прямого

пуску, а це означає найбільший пусковий струм, найбільше перевантаження мережі та великі механічні зусилля як у двигуні, так і у виконавчому органі робочої машини, окрім того, момент має коливний характер, що є недоліком.

При пуску з перемиканням «зірка-трикутник» максимальне значення моменту менше, ніж при прямому. Проте також завелике, отже, значення струму перевищує необхідне значення.

Під час пуску за допомогою пристрою плавного пуску та перетворювача частоти значення моменту значно менше, отже, ми отримуємо суттєве обмеження пускового струму, час пуску більший, але, власне, ми можемо його задавати.

Результати моделювання прямого пуску та пуску за схемою перемикання «зірка-трикутник» нам дали не цілком коректний результат, який можна трактувати як отримання великих значень пускового струму та коливного пускового моменту. Використана структурно-математична модель передбачає роботу двигуна на робочій ділянці механічної характеристики. При значеннях ковзання понад критичне результат наближений.



### Висновки

У проведеному дослідженні побудовано структурно-математичну модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, а також додаткового обладнання для проведення досліджень різних способів пуску.

Після проведеного моделювання отримали графічні залежності перехідних процесів при прямому пуску, із перемиканням «зірка-трикутник», із використанням пристрою плавного пуску та перетворювачем частоти з лінійним законом керування.

Результати проведених досліджень засвідчують, що за допомогою технічних засобів, таких як пристрій плавного пуску та перетворювач частоти, можна отримати регульований й контрольований запуск асинхронного двигуна, а саме: регулювати час пуску, вводити обмеження, забезпечити регулювання чи домогтися певного значення моменту, пускового струму тощо. За допомогою перетворювача частоти можна отримати регульовану швидкість обертання асинхронного двигуна з різними законами керування.

Як бачимо з отриманих результатів моделювання, дана математична модель не підходить для дослідження прямого пуску асинхронного двигуна, оскільки вона здійснює моделювання робочої ділянки механічної характеристики асинхронного двигуна і отриманий результат перевищує реальні показники, проте для дослідження частотного регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна підходить.

### Бібліографічний список

1. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. Москва: Высш. шк., 1965. 658 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Москва: Высш. шк., 1973. 658 с.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи. Москва: Гардарики, 2002. 536 с.
4. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2003. 256 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2001. 320 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Силовая электроника. Санкт-Петербург: КОРОНА принт, 2007. 256 с.
7. Гречин Д. П., Герман А. Ф., Дробот І. М. Континуальна математична модель електромагнітного поля асинхронної машини із зубчатим феромагнітним ротором. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2016. № 20. С. 34–41.
8. Гречин Д. П., Дробот І. М., Герман А. Ф., Дубік В. М. Вплив розмірів паза ротора на величину пускового моменту короткозамкненого асинхронного двигуна. *Збірник наукових праць Подільського державного аграрно-технічного університету. Технічні науки*. 2016. № 24, ч. 2. С. 47–54.
9. Электропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / Є. Л. Жулай та ін. Київ: Вища шк., 2001. 286 с.
10. Электропривод / О. С. Марченко та ін. Київ: Урожай, 1995. 208 с.
11. Закладний О. М., Праховник А. М., Соловей О. І. Энергобережения засобами промислового електропривода: навч. посіб. Київ: Кондор, 2005. 408 с.
12. Ключев В. И., Терехов В. М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов. Москва: Энергия, 1980. 360 с.
13. Мороз В. І., Паранчук Я. С., Костинюк Л. Д. Моделювання електроприводів. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004. 404 с.
14. Соколова Е. М. Электрическое и электромеханическое оборудование. Москва: Мастерство, 2001. 224 с.
15. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В. А. Елисеева, А. В. Шинянского. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 615 с.
16. Теорія електропривода / за ред. М. Г. Поповича. Київ: Вища шк., 1993. 495 с.
17. Чабан А. В., Левонюк В. Р., Дробот І. М., Герман А. Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у лінії Лехера в стані неробочого ходу. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. № 3. С. 30–35.
18. Чабан А. В. Принцип Гамільтона – Остроградського в електромеханічних системах. Львів: Вид-во Тараса Сороки, 2015. 488 с.
19. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. Санкт-Петербург: Питер, 2008. 288 с.
20. Mayr O. Beitrage zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens. *Archiv fur Elektrotechnik*. 1943'37. Heft 12. S. 588–608.

Стаття надійшла 03.10.2019