

ПАНЧЕНКО В. В., кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,  
 ТУРЕНКО О. Г., аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки  
 (Український державний університет залізничного транспорту)

## Дослідження прямого пуску тягового асинхронного електродвигуна за допомогою імітаційної моделі

У статті розглянуто роботу тягового асинхронного двигуна (АД) електровоза ДСЗ на основі його імітаційної моделі. Імітаційна модель створена на основі системи рівнянь у двофазній нерухомій системі координат  $\alpha, \beta$ . Досліджено прямий пуск при симетричному режимі живлення та отримано характеристики швидкості обертання, електромагнітного моменту та трифазного струму в часі.

**Ключові слова:** електровоз, асинхронний електродвигун, прямий пуск, математична модель, двофазна схема заміщення.

### Проблема постановки дослідження

Асинхронний двигун набув значного поширення як у простих системах нерегульованого електроприводу, так і в найскладніших сучасних системах регульованого електроприводу завдяки простоті конструкції, досить низькій собівартості та високому ККД.

Пуск АД з короткозамкненим ротором виконують при безпосередньому підключенні обмотки статора до мережі (прямий пуск) або при зниженні напруги на обмотку статора при пуску [1, 2]. Проте застосування прямого пуску цього типу електродвигуна в умовах тягового електрорухомого складу пов'язане з багатьма проблемами. Одна з таких проблем – значний пусковий струм при прямому пуску, який негативно впливає на якість електричної енергії [3], а також значні пульсації електромагнітного моменту.

### Аналіз останніх публікацій

Багато наукових досліджень присвячено різним методам пуску АД. В [4] розроблено методи та алгоритми числового аналізу пускових режимів, а [5] присвячено розробленню методу розрахунку часу пуску двигуна. В роботах [6, 7] розглядаються способи компенсації реактивної складової пускового струму за допомогою статичних конденсаторів.

### Мета статті

Дослідження прямого пуску тягового асинхронного електродвигуна в симетричному режимі живлення та отримання характеристик його роботи.

### Основна частина

З точки зору теорії автоматичного керування, АД являє собою складний нелінійний багатовимірний об'єкт з великою кількістю математичних моделей, що обумовлено різними формами математичного опису АД.

Для дослідження асинхронного двигуна була використана еквівалентна двофазна модель у нерухомій системі координат  $\alpha, \beta$ . Вона створена шляхом розкладання просторових векторів фазних величин на ортогональні осі прямокутної системи координат  $\alpha, \beta$ . При цьому вісь  $\alpha$  збігається з віссю  $a$  трифазної координатної системи  $a, b, c$ .

Для отримання ортогональних складових вхідних сигналів статора із трифазних скористаємося координатним перетворенням Кларк:

$$\begin{cases} U_{\alpha} = U_A \\ U_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_B - U_C) \end{cases} \quad (1)$$

Система рівнянь, що описують роботу асинхронного двигуна в нерухомій системі координат  $\alpha, \beta$  в операторній формі, має вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} U_{1\alpha} &= R_e \cdot (T_e \cdot p + 1) \cdot I_{1\alpha} - \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \psi_{2\alpha} - \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \psi_{2\beta} \\ U_{1\beta} &= R_e \cdot (T_e \cdot p + 1) \cdot I_{1\beta} - \frac{R_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot \psi_{2\beta} + \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot \omega \psi_{2\alpha} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\alpha} - L_m \cdot I_{1\alpha} - \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \psi_{2\alpha} \\ 0 &= (T_2 \cdot p + 1) \cdot \psi_{2\beta} - L_m \cdot I_{1\beta} - \frac{L_2}{R_2} \cdot z_p \cdot \omega \psi_{2\beta} \\ M_{EM} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot (\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}) \\ \omega &= \frac{1}{J \cdot p} \cdot (M_{EM} - M_C) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

де  $R_e = R_1 + R_2 \cdot \frac{L_m^2}{L_2}; T_e = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_e}; T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2}$ . (3)

Для моделювання було обрано тяговий асинхронний електродвигун АД914-У, паспортні дані якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1  
Паспортні дані електродвигуна АД914-У

Найменування параметра	Значення
Номінальна лінійна напруга, В	1870
Частота струму статора, Гц	55,9
Потужність на валу, кВт	1200
Номінальний струм, А	450
Номінальний електромагнітний момент, Н·м	10400
Частота обертання ротора, об/хв	1110
ККД	0,955
Коефіцієнт потужності	0,870
Активний опір фази статора, Ом	0,0026
Активний приведений опір обмотки ротора, Ом	0,0181
Індуктивний опір фази статора, Ом	0,213
Індуктивний приведений опір обмотки ротора, Ом	0,161
Індуктивний опір намагнічувального контуру, Ом	6,48

Для отримання трифазного струму скористаємося зворотним перетворенням Кларк:

$$\left\{ \begin{aligned} I_{1A} &= I_{1\alpha}; \\ I_{1B} &= -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}; \\ I_{1C} &= -\frac{1}{2} \cdot I_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{1\beta}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

На основі системи рівнянь (2) в програмному середовищі Matlab Simulink було розроблено імітаційну модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат  $\alpha, \beta$  (рис. 1).

При моделюванні динамічних процесів у нерухомій системі координат трифазний асинхронний двигун зводять до еквівалентної двофазної моделі, у якій обмотки зміщені на  $90^\circ$ , що відповідає живленню двигуна синусоїдальною двофазною напругою з фазою у  $90^\circ$ . Основною відмінністю від існуючих математичних моделей є те, що в даній моделі було використано координатне перетворення 3ф/2ф для задання трифазної напруги, що дасть змогу змоделювати несиметрію джерела живлення як за амплітудою, так і за фазою. Для того щоб показати характеристику трифазного струму, було використано координатне перетворення 2ф/3ф. Крім цього, блоком Friction було змодельовано процес тертя у двигуні. Значення тертя було прийнято як 1 % від номінального електромагнітного моменту.

У результаті моделювання отримано характеристики швидкості обертання, електромагнітного моменту та трифазного струму при прямому пуску АД при симетричному режимі живлення (рис. 2).

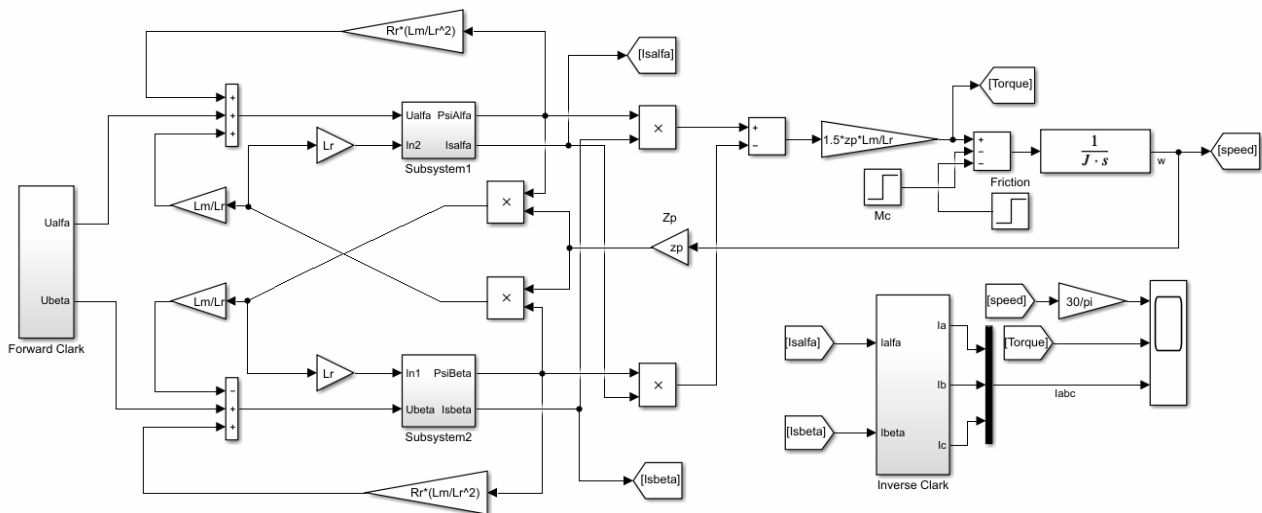


Рис.1. Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат

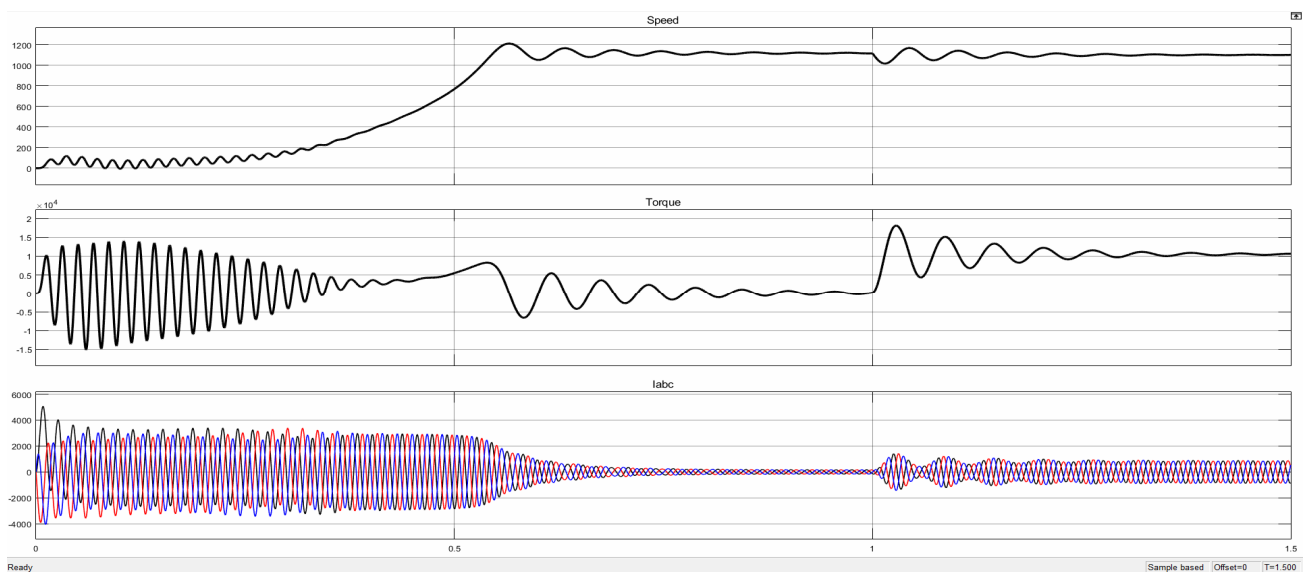


Рис. 2. Характеристики двигуна при симетричному режимі живлення

### Висновки

За допомогою системи диференціальних рівнянь було синтезовано двофазну імітаційну модель тягового асинхронного двигуна в нерухомій системі координат та отримано характеристики частоти обертання, електромагнітного моменту та трифазного струму при прямому пуску.

Розроблена модель дає змогу в подальших дослідженнях розглянути вплив несиметрії живильної напруги на характеристики роботи асинхронного електродвигуна.

### Список використаних джерел

1. Брускін Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины: в 2 ч.: учебн. для электротехн. спец. вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Высшая школа, 1987. Ч. 2. 335 с.
2. Белікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Одеса: Наука і техніка, 2012. 480 с.
3. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: монография / А. П. Черный, А. И. Гладырь, Ю. Г. Осадчук, И. Р. Курбанов, А. Н. Вошун. Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2006. 280 с.

4. Математичне моделювання пускових режимів асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором / В. С. Маляр, О. Є. Гамола, В. С. Мадай, І. І. Васильчишин (2021). URL: doi: 10.20998/2074-272X.2021.2.02.
5. Abhishek Garg, Arun Singh Tomar. Starting time calculation for induction motor. International Journal of Engineering Research and Applications, May 2015, vol. 5, iss. 5, pp. 56–60.
6. Афлятунов И. Ф. Асинхронный электропривод с конденсаторным пуско-регулирующим устройством: дис. канд. техн. наук: 05.09.03. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 150 с.
7. Вишневецкий Л. В., Муха Н. И., Павленко С. С. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности: монография. Одесса: НУ «ОМА», 2016. 160 с.

**Панченко В. В., Туренко А. Г. Исследование прямого пуска тягового асинхронного электродвигателя при помощи имитационной модели.**

**Аннотация.** В статье представлен теоретический анализ пусковых режимов асинхронного двигателя и проведено имитационное моделирование прямого пуска асинхронного двигателя АД914 в неподвижной системе координат с использованием программного обеспечения Matlab. Математическая модель тягового асинхронного электродвигателя в виде системы дифференциальных уравнений была получена из двухфазной схемы замещения асинхронного двигателя. В результате моделирования были получены характеристики прямого пуска: частота вращения, электромагнитный момент и трехфазный ток статора. В дальнейших исследованиях будет рассмотрено влияние несимметрии питающего напряжения на характеристики двигателя.

**Ключевые слова:** электровоз, асинхронный электродвигатель, прямой пуск, математическая модель, двухфазная схема замещения.

**Panchenko V., Turenko O. Investigation of direct starting of the traction asynchronous electric motor with the use of the simulation model.**

**Abstract.** Asynchronous electric motors are widely used due to their simple design, high reliability and low maintenance costs. They have been applied in electric drive systems with power from units of watts to thousands of kilowatts. In low-power systems, an unregulated electric drive is used with direct connection of the stator windings to the supply network. However, in high-power systems, such as electric rolling stock, with heavy start-up conditions, the use of direct start-up is inappropriate, since

the starting torque is 150% - 300% of the nominal, and the starting current can reach 300% - 800% of the nominal. The quality of the power supply network is also of great importance when it comes to starting an asynchronous electric motor. The voltage drop in the contact network, the phase voltage asymmetry negatively affect the operation of the motors and the service life, causing an increase in the heating of the stator and rotor, which leads to accelerated aging of the insulation and a decrease in engine power. Therefore, the study of starting modes is extremely important for the safe operation of asynchronous motors in rolling stock conditions.

The article presents a theoretical analysis of the starting modes of an asynchronous motor and simulates the direct start of an AD914 asynchronous motor using Matlab software. A mathematical model of a traction asynchronous electric motor in the form of a system of differential equations was obtained from a two-phase replacement circuit of an asynchronous motor in a fixed coordinate system  $\alpha, \beta$ . As a result of the simulation, the characteristics of the direct start were obtained: the rotation frequency, the electromagnetic moment and the three-phase stator current. Further studies will examine the effect of supply voltage asymmetry on engine performance.

**Keywords:** electric locomotive, induction motor, direct starting, mathematical model, two-phase equivalent circuit.

*Надійшла 11.06.2021 р.*

*Панченко Владислав Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.*

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>

E-mail: [panchenko\\_vv@kart.edu.ua](mailto:panchenko_vv@kart.edu.ua)

*Туренко Олександр Геннадійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.* ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0002-7592-7455>

E-mail:

[aleksandrturenko97@gmail.com](mailto:aleksandrturenko97@gmail.com)

*Panchenko Vladyslav, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.* ORCID iD:

<https://orcid.org/0000-0003-4822-7151>

E-mail: [panchenko\\_vv@kart.edu.ua](mailto:panchenko_vv@kart.edu.ua)

*Turenko Oleksandr, postgraduate student, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.* ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7592-7455> E-mail: [aleksandrturenko97@gmail.com](mailto:aleksandrturenko97@gmail.com)