

Юрій Дубравін^{1*}, Віктор Ткаченко²

¹ Доцент, кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9006-5198>

² Професор, кафедра електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Кирилівська, 9, м. Київ, 04071, Україна. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5513-2436>

* Автор, відповідальний за листування: dubravin_yf@gsuite.duit.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ

Перспективний електрорухомий склад (ЕРС) базується на застосуванні асинхронних тягових двигунів (АТД) із короткозамкненим ротором. Застосування асинхронного тягового електроприводу (АТП) дозволяє: збільшити потужність, силу тяги та швидкість ЕРС, підвищити надійність та знизити вартість життєвого циклу, збільшити термін служби. Крім того АТП подвійного живлення дає змогу забезпечити рух поїздів як на ділянках постійного струму напругою 3 кВ, так і на ділянках змінного струму напругою 25 кВ частотою 50 Гц без заміни ЕРС. У статті розглянуто математичну модель асинхронного тягового двигуна з урахуванням електричної та механічної частини тягового електроприводу. Модель описує електромагнітні процеси в обмотках статора у фіксованій системі координат α, β, γ , осі якої суміщені з осями фаз А, В, С статора. Процеси в короткозамкненому роторі описані в обертовій системі координат a, b, c . При моделюванні механічної частини електроприводу використовується основне рівняння динаміки, яке характеризує співвідношення між обертовим електромагнітним моментом і моментом опору на валу електродвигуна. В запропонованій моделі за допомогою функціональних блоків бібліотеки Simulink реалізовані методи імітаційного і структурного моделювання. Модель дозволяє досліджувати перехідні процеси з урахуванням: несинусоїдності та асиметрії напруги живлення; насиченості магнітної системи; ефекту витіснення струму в провідниках ротора; наявності міжвиткових замикань в обмотках статора та пошкоджень стрижнів ротора. Математична модель реалізована як матрична Simulink-модель асинхронного двигуна в MatLab. Достовірність математичної моделі перевірялась при проведенні віртуальних досліджень електромеханічних характеристик асинхронного двигуна типу АД914. Отримані результати підтвердили адекватність розробленої моделі та можливість використання розробленої моделі в інших практичних додатках.

Ключові слова: математична модель, асинхронний тяговий двигун, імітаційна модель, асиметричний режим, несинусоїдність напруги.

Вступ. На тяговому електрорухомому складі (ЕРС) залізниць активно впроваджуються асинхронні тягові двигуни (АТД), як на ділянках постійного струму з напругою 3 кВ, так і змінного струму з напругою 25 кВ і частотою 50 Гц. Встановлено, що застосування регульованого асинхронного тягового приводу (АТП) на ЕРС подвійного живлення є найбільш перспективним [1]. Підвищення конструкційної швидкості локомотивів базується на

застосуванні потужних АТД з короткозамкненим ротором. Показовим може бути АТП електровоза ДСЗ, де регулювання режимів роботи тягових двигунів здійснюється регулюванням напруги і частоти струму на обмотках статора за допомогою автономних інверторів напруги (АІН). АТД працюють в широкому діапазоні кутової швидкості та навантаження при живленні несинусоїдною імпульсною напругою. При низьких частотах в двигуні виникають значні пульсаційні моменти. Це створює значні механічні навантаження на стрижні ротора та інші вузли двигуна. Через комутаційні процеси в АІН в обмотці статора виникають небезпечні для ізоляції обмотки статора перенапруги. Значні пульсації струму в обмотках двигуна сприяють збільшенню втрат енергії, підвищенню температури обмоток АТД і, в результаті, – до передчасної відмови. Необхідний рівень надійності АТП в процесі експлуатації в першу чергу залежить від параметрів силового кола та системи керування АТП, які зумовлюють характер перехідних процесів та його енергетичні показники. Модель АТД, яка представлена в даній роботі, в складі моделі вхідного чотириквadrантного перетворювача [2] надає можливості для комплексного дослідження АТП ЕРС змінного струму. В процесі експлуатації АТД можливі такі дефекти, як замикання витків обмотки статора та пошкодження (обрив) стрижнів обмотки ротора. Тому розробка математичної моделі, що враховує наявність дефектів, необхідна також для розробки способів і засобів ранньої діагностики технічного стану тягових двигунів.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Відомо, що залежно від прийнятої системи координат моделі асинхронних двигунів діляться на три класи:

- моделі у природних трифазних системах координат статора (ABC) та ротора (abc);
- моделі у двофазних ортогональних системах координат;
- моделі двофазні з використанням ефективних або амплітудних значень сигналів.

У більшості робіт [3 – 6] при моделюванні асинхронних машин використовуються двофазні моделі, які передбачають виконання умов симетрії обмоток статора та ротора, симетрії та синусоїдальності напруги живлення. Особливої уваги заслуговує метод симетричних складових, в якому система несиметричної напруги статора зображується, як сума прямої і зворотної послідовності [7]. В статтях [8 – 11] проведено дослідження та аналіз енергетичної ефективності асинхронних двигунів загального призначення в режимах несиметрії та несинусоїдності напруги живлення. Значну увагу приділено питанням удосконалення моделей АТД з метою оцінки технічного стану та діагностики машин [12 – 15]. Математична модель АТД з коротко замкнутим ротором, описана у роботі [16], призначена для аналізу стаціонарних і перехідних процесів при наявності пошкоджень стрижнів ротора. Фізичні процеси в машині при пошкодженні в статорних обмотках та в «білячій клітці» ротора досліджені також за допомогою математичної моделі АТД з використанням штучних нейронних мереж у роботі [17].

Удосконалений метод спектрального аналізу тягового струму електровозів змінного струму та удосконалену модель роботи асинхронного тягового двигуна за участю несиметричних обмоток статора розглянуто у статтях [18, 19].

Незважаючи на досить велику кількість публікацій, присвячених дослідженню АТД, актуальними залишаються питання дослідження ефектів насичення магнітного кола, витіснення струму в роторі та ін.

Розрахункові дані показують на значний вплив нелінійності кривої намагнічування магнітопроводу на струм статора, струм намагнічування, сумарні втрати і втрати в сталі. При дослідженні характеристик АТД часто застосовуються моделі, які не враховують реальні фізичні процеси, що протікають в машині при живленні несинусоїдною напругою від АІН. Більшість моделей розроблено стосовно асинхронних двигунів загальнотехнічного призначення, які живляться від мережі синусоїдною напругою, рівень якої достатньо близький до номінальної. Режими роботи АТД тягового ЕРС регулюються автоматизованою системою керування згідно з оптимальним законом частотного управління, сформульованим академіком М. Костенком. При цьому регулюється частота струму в обмотках статора, підведена напруга

та ковзання. В даній статті запропоновано матричну модель асинхронного приводу, навантаженого поїздом і реалізовану на її основі комп'ютерну *Simulink*-модель. В моделі передбачена можливість формування вхідної напруги фаз статора як джерелом синусоїдних сигналів *Sine Wave* бібліотеки *Sources* так і інвертором напруги у відповідності зі схемою ЕРС. Проведено дослідження перехідних процесів в АТД з урахуванням асиметрії напруги, насичення магнітної системи, несинусоїдності струму та режимів роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка математичної моделі АТД для дослідження впливу на електромеханічні характеристики АТД таких факторів: асиметрії напруги, насичення магнітної системи, несинусоїдності струму і напруги, дефектів обмоток статора і ротора.

Матеріали та методи дослідження. Модель АТД складається з електричної та механічної частин. В основу комп'ютерної моделі покладено математичну модель трифазного асинхронного двигуна з коротко замкнутим ротором в нерухомій системі координат α, β, γ [20], осі яких суміщені з осями фаз *A, B, C* статора. Така модель придатна без додаткових перетворень рівнянь для дослідження різноманітних асиметричних режимів роботи, пов'язаних з асиметрією параметрів фаз статора і ротора, несинусоїдністю і асиметрією напруги живлення та наявністю в ній вищих гармонійних складових. При вирішенні поставлених задач використовувалися класична теорія електричних машин, математичний апарат теорії матриць та імітаційне моделювання. При математичному описі АТД приймаємо такі допущення: намагнічуючі сили обмоток розподілені синусоїдно вздовж кола рівномірного повітряного зазору; втрати та насичення магнітних кіл у статорі і роторі відсутні; обмотки статора та ротора симетричні, тобто мають однакову кількість витків; параметри обмоток ротора приведені до статора.

Математична модель АД включає систему рівнянь рівноваги напруги статора і ротора, записаних у відповідності з законом Кірхгофа у трифазній природній системі координат. Система диференціальних рівнянь електричної рівноваги кіл статора і ротора для миттєвих значень напруги, струмів і потокозчеплень, записаних у матричній формі [20, 21], для АД з коротко замкнутим ротором має такий вигляд:

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt}; \\ 0 = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{де } [i_s] = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}; \quad [\psi_s] = \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix}; \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}; \quad [\psi_r] = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$[u_s]$, $[i_s]$, $[\psi_s]$ – матриці миттєвих значень прикладеної напруги, струму і потокозчеплення фаз *A, B, C* обмотки статора; $[i_r]$, $[\psi_r]$ – матриці миттєвих значень струму і потокозчеплення фаз *a, b, c* обмотки ротора. Матриці активних опорів статора і приведених до статора активних опорів ротора мають вигляд:

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{pmatrix}; \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Обертовий магнітний потік взаємоіндукції створює потокозчеплення машини, обумовлене протіканням струму намагнічування. Потокозчеплення будь-якої фази статора і ротора визначаються величиною власної індуктивності обмоток і взаємної індуктивності з усіма іншими обмотками. Для прикладу, потокозчеплення фази «А» статора і фази «а» ротора при ненасиченому магнітопроводі АТД:

$$\psi_A = L_A i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c; \quad (4)$$

$$\psi_a = L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C + L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c, \quad (5)$$

де L_A, L_a – відповідно індуктивності фаз статора і ротора;

L_{xy} – взаємні індуктивності між обмотками x і y .

Аналогічно записуються рівняння для решти фаз АТД. Система рівнянь потокозчеплень для контурів статора запишеться в такому вигляді:

$$\begin{cases} \psi_A = L_A i_A + L_{AB} i_B + L_{AC} i_C + L_{Aa} i_a + L_{Ab} i_b + L_{Ac} i_c; \\ \psi_B = L_{BA} i_A + L_B i_B + L_{BC} i_C + L_{Ba} i_a + L_{Bb} i_b + L_{Bc} i_c; \\ \psi_C = L_{CA} i_A + L_{CB} i_B + L_C i_C + L_{Ca} i_a + L_{Cb} i_b + L_{Cc} i_c, \end{cases} \quad (6)$$

Система рівнянь потокозчеплень для контурів ротора має такий вигляд:

$$\begin{cases} \psi_a = L_{aA} i_A + L_{aB} i_B + L_{aC} i_C + L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c; \\ \psi_b = L_{bA} i_A + L_b i_B + L_{bC} i_C + L_{ba} i_a + L_{bb} i_b + L_{bc} i_c; \\ \psi_c = L_{cA} i_A + L_{cB} i_B + L_c i_C + L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_{cc} i_c, \end{cases} \quad (7)$$

Система рівнянь потокозчеплень для контурів статора в матричній формі має вигляд:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_A & L_{BA} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{Ba} & L_b & L_{Bc} \\ L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Система рівнянь потокозчеплень для контурів ротора :

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} \\ L_{bA} & L_b & L_{bC} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Відомо, що магнітний потік машини складається з головного магнітного потоку і потоку розсіювання. Електромагнітний зв'язок між статором і ротором здійснюється головним магнітним потоком взаємоіндукції Φ , який створює ЕРС взаємоіндукції в обмотках статора і

ротора. Індуктивні опори обмоток статора X_l і ротора X_2 обумовлені наявністю потоків розсіювання, пов'язаних тільки з цими контурами. Струм намагнічування машини залежить від індуктивного опору взаємоіндукції

$$X_m = \omega_1 L_m, \quad (10)$$

де ω_1 – кутова частота обертання поля обмоток статора, c^{-1} ;

L_m – повна індуктивність однієї фази обмотки статора від основного магнітного потоку при наявності струмів у інших фазах (індуктивність від частини магнітного потоку, створеного самою обмоткою і індуктивність від частини потоку, створеного іншими обмотками статора). При цьому загальна індуктивність фази статора L_s і фази ротора L_r складаються з повної індуктивності і індуктивності розсіювання:

$$L_s = L_m + L_{s\sigma}; \quad L_r = L_m + L_{r\sigma}.$$

За умови симетрії фаз, синусоїдальності магніторухливної сили, рівномірності повітряного зазору і приведення всіх величин до обмотки статора індуктивності та взаємні індуктивності визначаються такими рівняннями:

$$\begin{aligned} L_A = L_B = L_C &= \frac{2}{3} L_m \left(1 + \frac{3}{2} \sigma_s\right); \\ L_a = L_b = L_c &= \frac{2}{3} L_m \left(1 + \frac{3}{2} \sigma_r\right); \\ L_{AB} = L_{BC} = L_{CA} = L_{ab} = L_{bc} = L_{ca} &= -\frac{1}{3} L_m; \\ \sigma_s &= \frac{L_{s\sigma}}{L_m}; \sigma_r = \frac{L_{r\sigma}}{L_m}, \end{aligned} \quad (11)$$

де $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$, σ_s , σ_r – відповідно індуктивності розсіювання фаз статора і ротора та коефіцієнти розсіювання статора і ротора.

Взаємні індуктивності між фазами статора і ротора залежать від кута повороту ротора γ_r та описуються такими виразами [21]:

$$\begin{aligned} L_{Aa} = L_{Bb} = L_{Cc} &= \frac{2}{3} L_m \cos(\gamma_r); \\ L_{Ab} = L_{Bc} = L_{Ca} &= \frac{2}{3} L_m \cos\left(\gamma_r + \frac{2\pi}{3}\right); \\ L_{Ac} = L_{Ba} = L_{Cb} &= \frac{2}{3} L_m \cos\left(\gamma_r + \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Позначимо: $c_1 = (\gamma_r)$, $c_2 = (\gamma_r + \frac{2\pi}{3})$, $c_3 = (\gamma_r + \frac{4\pi}{3})$;

$$\begin{aligned} C &= \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_3 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix}; \\ \delta_s &= 1 + \frac{3}{2} \sigma_s, \quad \delta_r = 1 + \frac{3}{2} \sigma_r. \end{aligned} \quad (13)$$

Підставляючи в (8), (9) вирази (11), (12), (13) отримаємо для потокозчеплень контурів статора та ротора за умови симетрії фаз такі рівняння в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \delta_s & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_s & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L_m \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_3 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} c_1 & c_3 & c_2 \\ c_2 & c_1 & c_3 \\ c_3 & c_2 & c_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \delta_r & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_r & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Вирази (14), (15) містять такі матриці індуктивностей:

$$[L_s] = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \delta_s & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_s & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_s \end{bmatrix} \text{ – матриця індуктивностей обмоток статора;}$$

$$[L_{sr}] = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_3 & c_1 & c_2 \\ c_2 & c_3 & c_1 \end{bmatrix} \text{ – матриця взаємних індуктивностей обмоток статора і ротора;}$$

$$[L_{rs}] = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} c_1 & c_3 & c_2 \\ c_2 & c_1 & c_3 \\ c_3 & c_2 & c_1 \end{bmatrix} = L_{sr}^T \text{ – матриця взаємних індуктивностей обмоток ротора і статора;}$$

$$[L_r] = \frac{2}{3} L_m \begin{bmatrix} \delta_r & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_r & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_r \end{bmatrix} \text{ – матриця індуктивностей обмоток ротора.}$$

Врахування асиметрії фаз статора і ротора АТД. У процесі експлуатації АТД в результаті динамічних навантажень на стрижні ротора, вібрації та постійної зміни лінійних температурних розширень в матеріалі стержнів ротора відбуваються незворотні процеси, що приводять до зміни активного і індуктивного опорів ротора. При наявності пошкоджень в одному місці ротора матриця активних опорів ротора, приведених до обмотки статора буде мати вигляд:

$$[R_{rs}] = \begin{bmatrix} R_a k_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}, \quad (16)$$

де k_{rr} – коефіцієнт, що враховує частку збільшення опору фази ротора ($k_{rr} > 1$).

Зменшення індуктивності фази ротора вводимо за допомогою коефіцієнта $k_{rl} < 1$. Це приведе

до зміни коефіцієнта розсіяння ротора $\sigma_r = \frac{L_r \sigma k_{rl}}{L_m}$ та матриці індуктивностей ротора $[L_r]$.

Через комутаційні процеси в АІН в обмотці статора виникають небезпечні для ізоляції обмотки статора перенапруги, це може стати причиною пробоя ізоляції обмоток статора і міжвиткових замикань в котушках статора. При замиканні витків зменшується активний опір (R_A, R_B, R_C) відповідної фази, індуктивність розсіювання та повна індуктивність $[L_m]$ однієї фази обмотки статора. Значення вказаних параметрів залежить від кількості витків, що залишаються в роботі. Наприклад, при замиканні в фазі A статора:

$$R_{kA} = k_d R_A, \quad L_{k\sigma A} = k_d^2 L_{s\sigma}, \quad L_{km} = k_d L_m, \quad (17)$$

де $R_{kA}, L_{k\sigma A}, L_{km}$ – відповідно активний опір, індуктивність розсіювання, повна індуктивність пошкодженої фази;

k_d – коефіцієнт асиметрії;

$k_d = \frac{w_k}{w}$ – коефіцієнт асиметрії,

де w_k, w – кількість замкнутих витків та загальна кількість витків у фазі.

При цьому матриця індуктивностей обмоток статора

$$[L_s] = \frac{2}{3} k_d L_m \begin{bmatrix} \delta_{sk} & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \delta_s & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & \delta_s \end{bmatrix}, \quad (18)$$

де $\sigma_{sk} = 1 + \frac{3}{2} \sigma_s k_d$.

Після підстановки в (14), (15) виразів (2) та введених позначень, отримаємо:

$$[\psi_s] = [L_s] \times [i_s] + [L_{sr}] \times [i_r]; \quad (19)$$

$$[\psi_r] = [L_{rs}] \times [i_s] + [L_r] \times [i_r]. \quad (20)$$

На основі експериментальних даних режиму холостого ходу АТД типу АД914, отриманих при живленні синусоїдною напругою, розраховано магнітний потік Φ , потокозчеплення ψ та повна індуктивність однієї фази обмотки статора L_m . Струм намагнічування I_m змінювався в межах $0 \div 215$ А. Графіки залежностей магнітного потоку, потокозчеплення та повної індуктивності приведені на рис.1

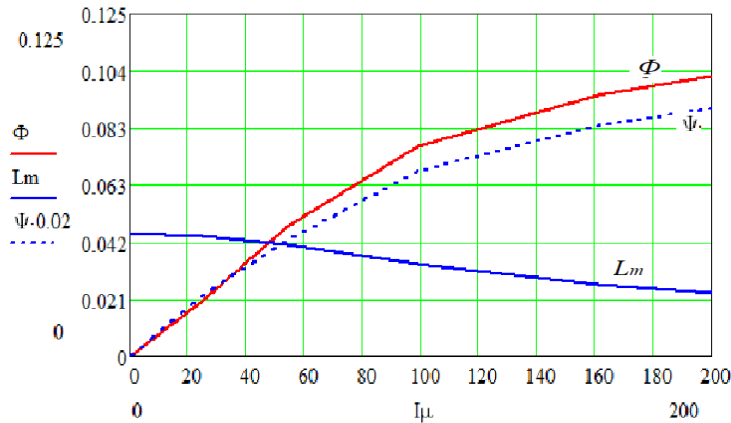


Рис. 1. Графіки залежностей магнітного потоку, потокозчеплення та повної індуктивності однієї фази обмотки статора від струму намагнічування

Крива повної індуктивності фази апроксимована поліномом четвертого порядку

$$L_m = aI_\mu^4 + bI_\mu^3 + cI_\mu^2 + dI_\mu + k, \quad (21)$$

де a, b, c, d, k – коефіцієнти апроксимації: $a = -1.965e^{-11}$; $b = 1.218e^{-8}$; $c = -2.277e^{-6}$; $d = 1.487e^{-5}$; $k = 0.045$.

Поєднуючи вектори потокозчеплень і струмів статора і ротора та матриці індуктивностей в одне ціле, отримуємо:

$$[\psi_0] = [L_0] \times [i_0], \quad (21)$$

де $[\psi_0], [L_0], [i_0]$ – об'єднані матриці потокозчеплень, струмів та клітинна матриця індуктивностей

$$[\psi_0] = \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix}; \quad [i_0] = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}; \quad [L_0] = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_r \end{bmatrix}. \quad (22)$$

З (18) матриця об'єднаних струмів статора і ротора має вигляд:

$$[i_0] = [L_0^{-1}] \times [\psi_0], \quad (23)$$

де $[L_0^{-1}]$ – обернена матриця індуктивностей.

При моделюванні механічної частини електроприводу використовується основне рівняння динаміки, яке характеризує співвідношення між обертальним електромагнітним моментом і моментом опору на валу електродвигуна:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{EM} - M_0, \quad (24)$$

де J – момент інерції на валу АТД;

ω – кутова частота обертання вала АТД;

M_{EM}, M_0 – відповідно електромагнітний момент і момент опору на валу АТД. Рівняння електромагнітного моменту АТД має вигляд:

$$M_{EM} = \frac{P}{\sqrt{3}} \begin{cases} I_r^T D \psi_r \\ \psi_s^T D I_s \end{cases}, \quad (25)$$

де $D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$ – постійний матричний коефіцієнт.

Момент інерції двигуна й інерції маси поїзда, приведений до валу АТД, можна записати так:

$$J_p = \frac{(P+Q)(1+\gamma)R_k^2}{N_d \eta_z \mu^2} \cdot 10^3, \quad (26)$$

де J_p – приведений момент інерції;

P, Q – відповідно вага локомотива та поїзда;

γ – коефіцієнт інерції поїзда;

R_k – радіус колісної пари;

N_d – кількість АТД в електроприводі електровоза;

η_z – к.к.д. тягового редуктора;

μ – передавальне відношення тягового редуктора;

Для розрахунку моменту опору на валу АТД з урахуванням поїзда застосована формула:

$$M_0 = \frac{W_k R_k}{N_d \eta_z \mu}, \quad (27)$$

де W_k – повний опір руху потяга.

Структурна схема моделі. Згідно з вихідними положеннями і рівняннями (1–27) в середовищі програмних і інструментальних засобів *MatLab* розроблена функціональна модель АТД типу АД914 з коротко замкнутим ротором (рис. 2). Основні технічні характеристики електродвигуна типу АД914 приведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики електродвигуна типу АД914

№	Назва	Величина
1	Потужність на валу, кВт	1200
2	Напруга лінійна, В	1870
3	Сила струму тривалого режиму, А	450
4	Частота напруги живлення, Гц	55,9
5	Число полюсів 2Р	6

№	Назва	Величина
6	Струм холостого ходу, А	51,3
7	Активний опір фази статора при температурі 150°C, Ом	0,0344
8	Активний опір обмотки ротора приведенний до статора при температурі 150°C, Ом	0,0275
9	Індуктивний опір фази статора при частоті 50 Гц, Ом	0,213
10	Індуктивний опір обмотки ротора приведенний до статора при частоті 50 Гц, Ом	0,161

Функціональна модель АТД (рис. 2) дає змогу розраховувати перехідні процеси із врахуванням асиметрії фаз, несинусоїдності напруги, струму та насичення магнітопроводу.

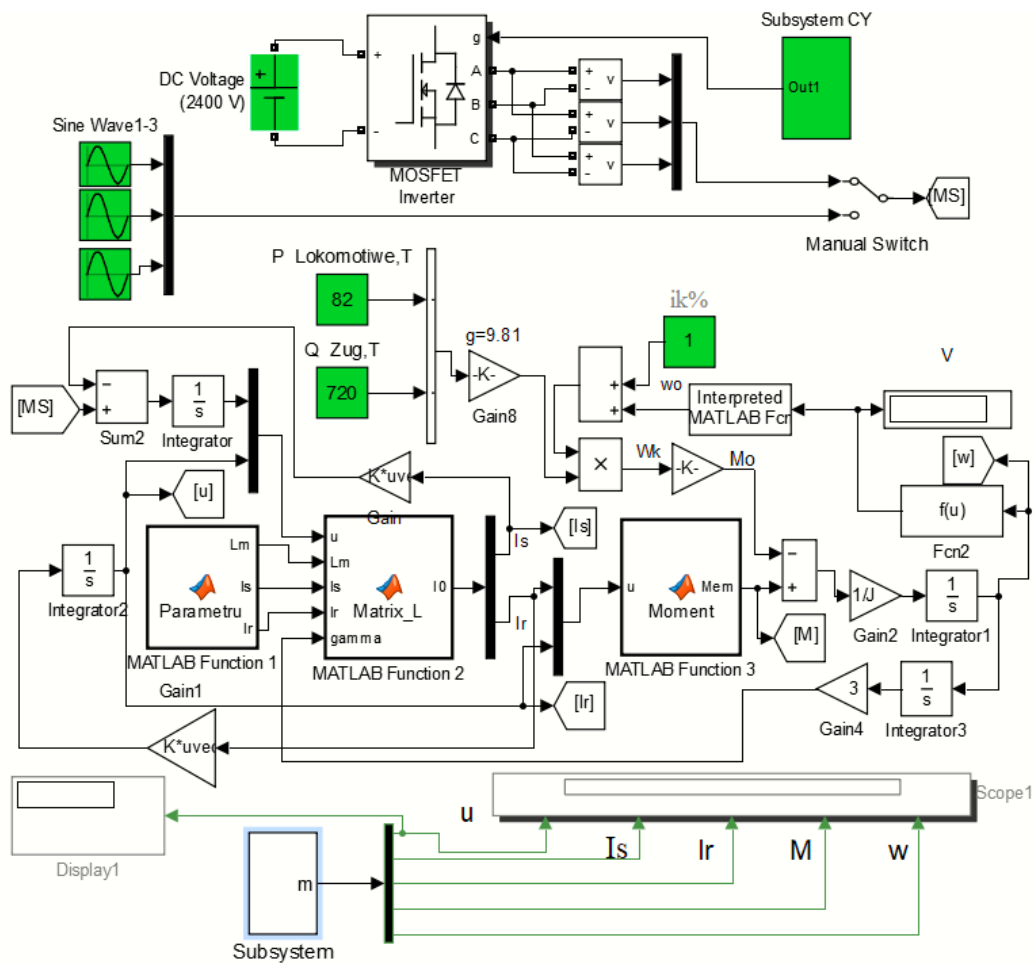
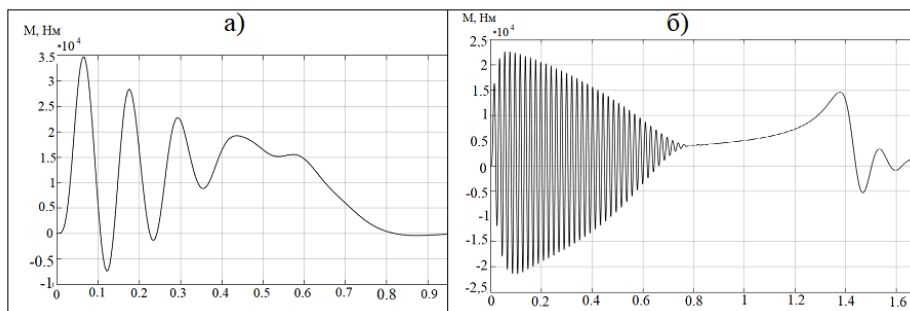


Рис. 2. Функціональна модель АТД

Вхідна напруга фаз статора U_A, U_B, U_C формується джерелом синусоїдної напруги *Sine Wave* бібліотеки *Sources*. Для дослідження несиметрії вхідної напруги достатньо в джерелах напруги ввести необхідні параметри напруги. Живлення АТД на ЕРС здійснюється несинусоїдною напругою від АІН, який перетворює напругу ланки постійного струму в трифазну, регульовану по величині в межах $0 \div 1850$ В та по частоті в межах $0 \div 150$ Гц.

Електромагнітний розрахунок АТД АД914, згідно з методикою НДІ «Електроважмаш», передбачає варіанти живлення від синусоїдного джерела напруги при стендових випробуваннях та несинусоїдною напругою на електровозі від перетворювача частоти. Можливість дослідження електроприводу при вказаних напругах забезпечується ключом *Manual Switch*. Напрузі ланки постійного струму відповідає джерело постійного струму *DC Voltage Source* з амплітудою 2400 В. В моделі спочатку визначається потокозчеплення статора і ротора шляхом інтегрування рівнянь (1). Всі подальші операції математичної моделі виконуються за допомогою програмних засобів функцій *MATLAB Function1-3*. При цьому в *MATLAB Function1* розраховуються всі необхідні параметри моделі, а в *MATLAB Function 2* виконуються розрахунки струмів статора та ротора. Розрахунок електромагнітного моменту здійснюється за допомогою *MATLAB Function 3*.

Дослідження перехідних електромагнітних процесів в режимі холостого ходу. В ході моделювання проведено дослідження перехідних електромагнітних процесів в режимі холостого ходу, при зрушенні електровоза з місця без навантаження та в складі поїзда. Електромагнітні процеси АТД залежать від напруги, частоти струму, навантаження та від режиму роботи, який визначається законом частотного управління академіка М. Костенка. В період пуску напруга живлення АТД повинна плавно нарощуватись від мінімального значення до номінального значення синхронно зі збільшення частоти струму статора. Осцилограма моменту на валу двигуна при напрузі 300 в і частоті 10 Гц показана на рис. 3, а. Подача на статор номінальної напруги під час пуску недопустима в зв'язку з обмеженням по максимальному струму (рис. 3, б).



**Рис. 3. Осцилограми моменту на валу двигуна
(а) при зниженій напрузі живлення і частоті струму 10 Гц
та (б) при номінальній напрузі в режимі тяги одиничного електровоза**

При зростанні напруги відбувається процес насичення магнітного кола внаслідок збільшення ЕРС взаємоіндукції, магнітного потоку взаємоіндукції та магнітної індукції. Осцилограми моменту на валу двигуна та частоти обертання валу при напрузі $0,5U_n$ при зрушенні потяга приведені відповідно на рис 4, а та 4, б. Зі збільшенням навантаження зростає ковзання ротора, збільшується струм обмоток статора і зменшується ЕРС взаємоіндукції. При збільшенні ковзання в роторі відбувається зменшення індуктивного опору взаємоіндукції і збільшення струму намагнічування. Осцилограми потокозчеплення статора та ротора АТД при зрушенні електровоза з місця показані на рис. 5. Осцилограми потокозчеплення свідчать, що в початковий період пуску $0 - 0,5$ с амплітуда потокозчеплення зростає, після чого відбувається робота АТД при практично стабільному рівні потокозчеплення при незмінному магнітному потоці намагнічування. В роторі характер потокозчеплення змінюється залежно від ковзання ротора.

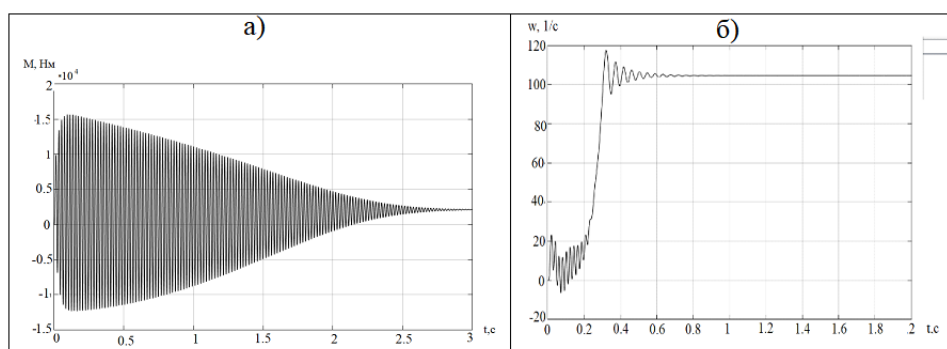


Рис. 4. Осцилограми моменту на валу двигуна (а) та частоти обертання валу (б) при нарузі $0,5U_H$ при зрушенні потяга

Запропонована математична модель описує електромагнітні процеси у статорних обмотках асинхронного двигуна в нерухомій системі координат, суміщеній з осями фаз A, B, C статора, а процеси в роторі – в обертовій системі координат ротора a, b, c . Використання математичного апарату для дослідження АТД має значні труднощі.

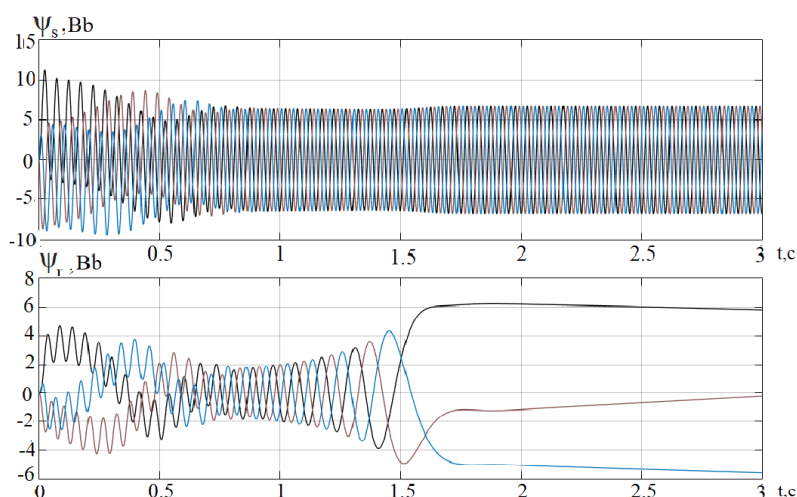


Рис. 5. Осцилограми потокозчеплення статора (верхня) та ротора (нижня) АТД при зрушенні електровоза з місця

Широкі можливості для аналізу електромагнітних процесів в АТД надає бібліотека *Simscape Library Simulink*, в підрозділі *SimPowerSystems* якої є блоки віртуальних асинхронних машин. Використання їх є найбільш зручними у застосуванні при реалізації математичної моделі. Однак, необхідно врахувати, що в основі стандартних *SPS*-моделей асинхронних двигунів бібліотеки *SimPowerSystems MatLab* лежать рівняння ідеалізованої еквівалентної двофазної машини в ортогональних двофазних координатах. Тому *SPS*-моделі не забезпечують необхідний рівень адекватності при дослідженні асиметрії АТД. В *Simulink* є можливість поєднувати методи імітаційного і структурного моделювання та створювати *S*-моделі за допомогою функціональних блоків бібліотеки *Simulink*. В запропонованій функціональній моделі використані блоки *MATLAB Function*, інтегратори, підсилювачі та інші функціональні *S*-блоки, які описують процеси в асинхронному електроприводі. Передбачена можливість живлення функціональної *S*-моделі від віртуальної *SPS*-моделі блока живлення *DC-ЗАС*. Удосконалення дають змогу досліджувати процеси як в симетричному, так і в асиметричному режимах роботи асинхронного тягового

приводу при живленні як синусоїдним, так і несинусоїдним струмом. Отримані результати свідчать про працездатність моделі і можливість її використання при дослідженні перехідних процесів в електромагнітних колах АТД. Оцінка адекватності моделі проведена шляхом порівнянням отриманих результатів моделювання з експериментальними даними досліджень електромеханічних характеристик АТД типу АД914, представленими заводом «Електроважмаш». Отримані результати підтвердили адекватність розробленої моделі та можливість використання розробленої моделі в інших практичних додатках. Розроблена модель дає змогу вирішувати широке коло дослідницьких та моніторингових задач, пов'язаних з розробкою та експлуатацією АТД.

Висновки. 1. Розроблена матрична Simulink – модель АТД з короткозамкненим ротором, яка дозволяє досліджувати перехідні процеси з урахуванням: несинусоїдності та асиметрії напруги живлення; насиченості магнітної системи; ефекту витіснення струму в провідниках ротора; наявності міжвиткових замикань в обмотках статора та пошкоджень стрижнів ротора.

2. Використання методів імітаційного і структурного моделювання на базі функціональних блоків бібліотеки Simulink забезпечують можливість розширення функціональних можливостей запропонованої моделі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Иньков Ю.М., Литовченко В.В., Назаров Д.В. Особенности тягового электрооборудования перспективного электроподвижного состава. // Журнал «Электротехника». 2016. №. 9. С. 38-44. ISSN: 0013-5860
2. Дубравін Ю.Ф., Ткаченко В.П. Дослідження моделі активного чотириквadrантного перетворювача магістрального електровоза змінного струму// Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій: Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 34. К.: ДУІТ, 2019. С.155-174. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-13>.
3. Ruan J.Y., Wang S.M. Magnetizing Curve Estimation of Induction Motors in Single-Phase Magnetization Mode Considering Differential Inductance Effect //IEEE Transactions On Power Electronics. 2016. Vol.: 31, №. 1. P. 497-506. Available at:www.ieee.org.
4. Chioncel C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque // International Conference on Applied Sciences 2015. P.1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012005>.
5. Pakkiraiah B., Sukumar G.D. A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive // Indian Journal of Science and Technology. 2016 Vol.: 9(45). P. 1-10. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313>.
6. Balara D., Timko J., Zilkova J., Leso M (SK). Neural Networks Application For Mechanical Parameters Identification Of Asynchronous Motor // Neural Network World. 2017, №3. P. 259 – 270. <https://doi.org/10.14311/NNW.2017.27.013>.
7. Goolak, S., Gerlici, J., Tkachenko, V., Sapronova, S., Lack, T., & Kravchenko, K. Determination of parameters of asynchronous electric machines with asymmetrical windings of electric locomotives. Communications-Scientific letters of the University of Zilina. 2019. Vol. 21(2), pp. 24-31. <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.2.24-31>
8. P. Donolo et al. Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations//Electric Power Systems Research 140. 2016. p. 866–873.
9. A. Sapena-Bano, Manuel Pineda-Sanchez, Rubén Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, Z. Kanovic. Low-Cost Diagnosis of Rotor Asymmetries in Induction Machines Working at a Very Low Slip Using the Reduced Envelope of the Stator Current. IEEE Transactions on energy conversion.30(4). 2015. p. 1409-1419.
10. Кузнецов В.В., Николенко А.В. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии и оборудование 2015. Т.1, №8(73). С. 37 – 42. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36755
11. Артеменко Ю.П., Демченко А.Г. Модель асинхронного двигателя в составе канала бортовой системы электроснабжения переменного тока. Научный Вестник МГТУ ГА Том 20, № 01, 2017 С.141-151
12. Qi Y., Shen C., Wang D., Shi J., Jiang X. Zhu Z. Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 15066–15079
13. Qi Yuan, Shen C., Wang D., Shi J., Jiang X. Zhu Z. Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery. IEEE Access, 2017, vol. 5, pp. 15066–15079
14. Qi Yuan, Zafarani M., Akin B., Fedigan S. E. Analysis and detection of inter-turn shortcircuit fault through extended self-commissioning. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, vol. 53 (3), pp. 2730–2739.
15. Anand B. Aspalli M. Dynamic dq model of induction motor using Simulink. Intern.Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 2015, vol. 24 (5), pp. 252–257.
16. Хамидов О.Р. Математическое моделирование асинхронных тяговых двигателей с короткозамкнутым ротором. Бюллетень результатов научных исследований// Известия Петербургского университета путей сообщения. ISSN: 2223-9987.2019 С.41-47

17. Хамидов О. Р. Диагностирование и моделирование несимметричных режимов асинхронных тяговых электродвигателей локомотивов с применением искусственных нейронных сетей // Известия Петербургского университета путей сообщения. ISSN: 1815-5BBX. №2, 2019. С.251-262.
18. Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. *Transport*, 2020, Vol. 35(6), pp. 658-668. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>.
19. Goolak, S., Liubarskyi, B., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, I., Glebova, M.. Improving a Model of the Induction Traction Motor Operation Involving Non-Symmetric Stator Windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, Vol. 4(8(112)), pp. 45-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236825>, <https://ssrn.com/abstract=3921778>.
20. Толочко О.І. Розробка моделей складних електромеханічних систем в середовищі пакета MATLAB з використанням блоків додатку віртуального фізичного моделювання Simscape // Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електропривода. Харків: НТУ «ХПІ», 2015, С.118-123.
21. Толочко О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Навчальний посібник. Київ, НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.

REFERENCES

1. Inkov, YU.M., Litovchenko, V.V., Nazarov, D.V. (2016). Osobennosti tyagovogo elektrooborudovaniya perspektivnogo elektropodvizhnogo sostava [Features of traction electrical equipment promising electric rolling stock]. *Zhurnal Elektrotehnika – Russ. Electr. Engin.*, 9, 38–44 [in Russian] ISSN: 0013-5860
2. Dubravin, YU.F., Tkachenko, V.P.(2019). Doslidzhennya modeli aktivnoho chotyrykvadrantnoho peretvoryuvacha mahistral'noho elektrovoza zminnoho strumu [Investigation of the model of an active quadrangular converter of a backbone electric locomotive]. *Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnogo universytetu infrastruktury ta tekhnolohiy – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 34,155-174 [in Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-1-13>
3. Ruan, J.Y., Wang, S.M.(2016). Magnetizing Curve Estimation of Induction Motors in Single-Phase Magnetization Mode Considering Differential Inductance Effect. *IEEE Transactions On Power Electronics*,1(31), 497-506. Available at:www.ieee.org.
4. Chioncel, C. P., Tirian G. O., Gillich N., Raduca E. (2015). Vector control structure of an asynchronous motor at maximum torque. *International Conference on Applied Sciences*, 1 – 6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012005>
5. B. Pakkiraiah, G.D. Sukumar.(2016). A New Modified Artificial Neural Network Based MPPT Controller for the Improved Performance of an Asynchronous Motor Drive. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(45), 1–10 DOI: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i45/105313>
6. D. Balara, J. Timko, J. Zilkova, M. Leso (SK). (2017). Neural Networks Application For Mechanical Parameters Identification Of Asynchronous Motor. *Neural Network World*, 3, 259 – 270 DOI: <https://doi.org/10.14311/NNW.2017.27.013>
7. Goolak, S., Gerlici, J, Sapronova, S., Tkachenko, V., Lack, T., Kravchenko, K. (2019). Determination of Parameters of Asynchronous Electric Machines with Asymmetrical Windings of Electric Locomotives. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, 21(2), 24-31. ISSN 2585-7878 DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.2.24-31>
8. P. Donolo et al. (2016). Voltage unbalance and harmonic distortion effects on induction motor power, torque and vibrations. *Electric Power Systems Research*, 140, 866–873.
9. A. Sapena-Bano, Manuel Pineda-Sanchez, Rubén Puche-Panadero, J. Martinez-Roman, Z. Kanovic. (2015). Low-Cost Diagnosis of Rotor Asymmetries in Induction Machines Working at a Very Low Slip Using the Reduced Envelope of the Stator Current. *IEEE Transactions on energy conversion*, 30(4), 1409-1419.
10. Kuznetsov, V.V., Nikolenko, A.V.(2015). O modelyakh funktsionirovaniya asinkhronnogo dvigatelya v usloviyakh nekachestvennoy elektroenergii [About models of functioning of an induction motor in conditions of low-quality electricity]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy. Energoberegayushchiye tekhnologii i oborudovaniye –Eastern European Journal of Advanced Technologies. Energy saving technologies and equipment*, №8(73), 37 – 42 [in Russian] DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36755>
11. YU.P. Artemenko, A.G. Demchenko.(2017). Model asinkhronnogo dvigatelya v sostave kanala bortovoy sistemy elektrosnabzheniya peremennogo toka [Model of an asynchronous motor as a part of the channel of the on-board AC power supply system]. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA – Scientific Bulletin MGTU GA*,1(20),141-151 [in Russian]
12. Y Qi. (2017). Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery. *IEEE Access*, 5, 15066–15079.
13. Yuan Qi ,C. Shen, D. Wang, J. Shi, X. Jiang, & Z. Zhu. (2017). Stacked sparse autoencoder-based deep network for fault diagnosis of rotating machinery. *IEEE Access*, 5, 15066–15079.
14. Yuan Qi, M. Zafarani, B. Akin , S.E. Fedigan. (2017). Analysis and detection of inter-turn shortcircuit fault through extended self-commissioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53 (3), 2730–2739.
15. B. Anand, M. Aspalli .(2015). Dynamic dq model of induction motor using Simulink. *Intern.Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 24 (5), 252–257.
16. O.R. Khamidov. (2019). Matematicheskoye modelirovaniye asinkhronnykh tyagovykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom [Mathematical modeling of squirrel-cage induction traction motors]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya– Bulletin of the Petersburg University of Railways*, ISSN: 2223-9987, 41-47 [in Russian]

17. O. R Khamidov.(2019). Diagnostirovaniye i modelirovaniye nesimmetrichnykh rezhimov asinkhronnykh tyagovykh elektrodvigately lokomotivov s primeneniyyem iskusstvennykh neyronnykh setey [Diagnosis and modeling of asymmetric modes of asynchronous traction electric motors of locomotives using artificial neural networks]. // *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya – Bulletin of the Petersburg University of Railways*.ISSN: 1815-5BBX.№2. S.251-262 [in Russian]

18. Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. (2020). Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. *Transport*, 35(6), 658-668. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>.

19. Goolak, S., Liubarskyi, B., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, I., Glebova, M. (2021). Improving a Model of the Induction Traction Motor Operation Involving Non-Symmetric Stator Windings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8(112)), 45-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236825>, <https://ssrn.com/abstract=3921778>.

20. Tolochko O.I.(2015). Rozrobka modeley skladnykh elektromekhanichnykh system v seredovyshti paketa MATLAB z vykorystanniam blokiv dodatku virtual'noho fizychnoho modelyuvannya Simscape [Development of models of complex electromechanical systems in the environment of the MATLAB package using blocks of virtual physical simulation application Simscape]. // *Visnyk NTU KHPI .Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. – Bulletin of NTU KhPI. Problems of automated electric drive*,118-123 [in Ukrainian]

21. Tolochko O.I. (2016). Modelyuvannya elektromekhanichnykh system. Matematyчне modelyuvannya system asynkhronnoho elektropryvoda [Modeling of electromechanical systems. Mathematical Modeling of Asynchronous Drive Systems]. *A Tutorial, NTUU KPI, – 150* [in Ukrainian]

Yuri Dubravin¹, Viktor Tkachenko²

¹ Ph.D Tech. S., Associate Professor, Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

² Dr. Tech. S., Department of Electromechanics and Rolling Stock of Railways, State University of Infrastructure and Technology, Kyrylivska str., 9, Kyiv, Ukraine, 04071

RESEARCH ON THE MODEL OF ASYNCHRONOUS TRACTION ENGINE OF THE AC ELECTRIC LOCOMOTIVE

Promising electromotive rolling stock is based on application of asynchronous traction engines with a short-circuited rotor. The use of asynchronous traction motor controller allows: increase power, tractive force and speed of electromotive rolling stock, promote reliability and bring down the cost of life cycle, increase lifetime. In addition to this asynchronous traction motor controller of double power gives an opportunity to provide train traffic through the areas of direct current with a voltage of 3 kV as well as on the areas of alternating current with voltage of 25 kV at a frequency of 50 Hz without replacement of electromotive rolling stock. In the article the mathematical model of asynchronous traction engine is considered taking into account electric and mechanical part of traction motor controller. A model describes electromagnetic processes in stator windings in the fixed α, β, γ coordinate system, which has its axis combined with the axis of stator phases A, B, C. Processes in a shortcircuited rotor are described in the rotating a, b, c coordinate system. For the modeling of mechanical part of motor controller basic equation of dynamics, that characterizes ratio between an electromagnetic torque and section modulus in the shaft of the electric motor, is used. In a proposed model simulation and structural modeling methods were implemented by means of function modules of the Simulink library. A model allows to investigate transition processes given: nonsinusoidal and asymmetric supply voltage; saturation of the magnetic system; current crowding out effect in the rotor conductors; presences of shortings between the turns of the stator winding and damages of rotor rods. A mathematical model is implemented as matrix Simulink model of asynchronous engine in MatLab. Credibility of the mathematical model was checked up while conducting virtual researches of electromechanics characteristics of asynchronous engine of type AD914. The outcome confirmed the adequacy of the implemented model and the possibility of the implemented model to be used in other applications.

Keywords : mathematical model, asynchronous traction engine, simulation model, asymmetric mode, nonsinusoidal tensions.