

УДК 621.313.33

канд. техн. наук, доцент, докторант Д. О. Кулагін  
Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

### **Визначення динамічних індуктивностей асинхронного двигуна з урахуванням процесів насичення**

*Встановлена математична залежність між динамічними індуктивностями асинхронної машини та параметрами насичення, що є необхідним при оптимізації енергетичних характеристик в залежності від навантаження на електропривод при роботі зі зниженим значенням модуля вектора потокозчеплення ротора. Проведене дослідження виконано в загальному вигляді, що дозволяє використовувати його результати для асинхронних двигунів різних серій.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, намагнічування, потокозчеплення, індуктивність, насичення, математична модель.

**Вступ.** Для встановлення оптимальних режимів роботи електроприводів з метою досягнення кутових швидкостей обертання асинхронних двигунів вище за номінальну, при оптимізації енергетичних характеристик в залежності від навантаження система керування або оператор повинні переводити двигуни у зону роботи зі зниженим значенням модуля вектора потокозчеплення ротора. При такій зміні режимів роботи необхідним є врахування в математичній моделі системи керування тяговою електропередачею зміни параметрів тягового двигуна, що пов'язана з ефектом насичення магнітної системи асинхронної машини [1-5]. В такому разі необхідним є визначення динамічних індуктивностей асинхронного двигуна, що значно змінюються в залежності від насичення [1-3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В даному напрямку виконана значна робота вітчизняними та закордонними науковими школами [1-11], причому дослідження процесів насичення асинхронних машин продовжуються і надалі, що пояснюється актуальністю даного питання з огляду на стрімкий розвиток систем керування, підвищенням вимог з боку виконавчих механізмів до якості керування та перехідних процесів.

Отже, з наведеного можна зробити висновок про актуальність проведення досліджень в даному напрямку.

**Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Не дивлячись на значну кількість проведених досліджень, наявність наукових шкіл за даним напрямком [1, 3, 4, 7, 8, 10, 11] залишається ще низка питань, які потребують уточнення, дослідження чи розрахунку. Серед таких питань знаходиться встановлення математичної залежності між динамічними індуктивностями асинхронної машини та параметрами насичення асинхронного двигуна, чому і буде присвячена дана стаття.

**Актуальність дослідження.** Вирішення вказаної задачі даної наукової статті дозволить проводити розрахунок тангенціальної та радіальної динамічної індуктивностей асинхронної машини адекватно реальним фізичним процесам насичення, що відбуваються у асинхронному двигуні.

**Мета роботи** – встановлення математичної залежності між динамічними індуктивностями асинхронної машини та параметрами насичення двигуна.

**Матеріали дослідження.** Розглянемо математичну модель асинхронного двигуна [6]. Напрямок поздовжньої осі  $d$  приймається за дійсну вісь, а напрямок поперечної  $q$  осі – за уявну вісь. Система диференціальних рівнянь, в координатах  $(d, q)$ , жорстко пов'язаній з ротором тягового асинхронного двигуна (рівняння Парка) має наступний вигляд:

$$\begin{cases} u_{sd} = i_{sd} \cdot r_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_r \cdot \psi_{rq}; \\ u_{sq} = i_{sq} \cdot r_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_r \cdot \psi_{rd}; \\ u_{rd} = i_{rd} \cdot r_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ u_{rq} = i_{rq} \cdot r_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $u_{sd}, u_{sq}$  - проекції узагальненого вектора статорної напруги  $\vec{U}_s$  двигуна;

$u_{rd}, u_{rq}$  - проекції узагальненого вектора роторної напруги  $\vec{U}_r$  двигуна;

$r_{rd}, r_{rq}$  - відповідні значення опорів роторних обмоток за напрямками системи координат;

$r_{sd}, r_{sq}$  - відповідні значення опорів статорних обмоток за напрямками системи координат;

$i_{sd}, i_{sq}$  - проекції узагальненого вектора статорного струму  $\vec{i}_s$  двигуна;

$i_{rd}, i_{rq}$  - проекції узагальненого вектора роторного струму  $\vec{i}_r$  двигуна;

$\psi_{rd}, \psi_{rq}$  - проекції узагальненого вектора потокозчеплення ротора  $\vec{\psi}_r$  двигуна;

$\psi_{sd}, \psi_{sq}$  - проекції узагальненого вектора потокозчеплення статора  $\vec{\psi}_s$  двигуна;

$\frac{d}{dt}$  - оператор диференціювання за часом;

$\omega_r$  - відносна кутова швидкість, яка визначається наступним чином:

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt}. \quad (2)$$

Системи координат ротора і статора переміщуються одна відносно одної, причому кут  $\theta$  є кутом між осями і саме він визначає значення  $\omega_r$ . Проекції векторів потокозчеплення статора  $\vec{\psi}_s$  та потокозчеплення ротора  $\vec{\psi}_r$  можна визначити так:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = i_{sd} \cdot L_{\sigma s} + i_{rd} \cdot L_m; \\ \psi_{sq} = i_{sq} \cdot L_{\sigma s} + i_{rq} \cdot L_m; \\ \psi_{rd} = i_{sd} \cdot L_m + i_{rd} \cdot L_{\sigma r}; \\ \psi_{rq} = i_{sq} \cdot L_m + i_{rq} \cdot L_{\sigma r}. \end{cases} \quad (3)$$

В системі (3) величини  $L_{\sigma s}$ ,  $L_{\sigma r}$  та  $L_{\sigma s}$ ,  $L_{\sigma r}$  є власними індуктивностями, а величина  $L_m$  - взаємною індуктивністю статора і ротора.

Для значення струму намагнічування можна записати наступне:

$$i_\mu = \sqrt{i_{\mu d}^2 + i_{\mu q}^2} = \sqrt{(i_{sd} + i_{rd})^2 + (i_{sq} + i_{rq})^2}. \quad (4)$$

Похідна вектора робочого потокозчеплення на основі [1] дорівнює

$$\frac{d\vec{\psi}_\delta}{dt} = \frac{d\vec{\psi}_\delta}{d\vec{i}_\mu} \cdot \frac{d\vec{i}_\mu}{dt} = L^\delta \cdot \frac{d\vec{i}_\mu}{dt} = \begin{bmatrix} L_d^\delta & M_{dq}^\delta \\ M_{qd}^\delta & L_q^\delta \end{bmatrix} \cdot \frac{d\vec{i}_\mu}{dt}, \quad (5)$$

де  $L^\delta$  - тензор динамічних індуктивностей насиченої машини, який за своїм математичним змістом є оператором, що діючи на нескінченно мале прирощення вектора намагнічуючого струму  $\vec{i}_\mu$ , перетворює його у відповідне прирощення вектора робочого потокозчеплення  $\vec{\psi}_\delta$ .

У відповідності до дослідження [1] приймаємо

$$\frac{d\vec{\psi}_\delta}{dt} = \frac{d\vec{\psi}_\delta}{d\vec{i}_\mu} \cdot \frac{d\vec{i}_\mu}{dt} = L^\delta \cdot \frac{d\vec{i}_\mu}{dt} = \begin{bmatrix} L_d^\delta & M_{dq}^\delta \\ M_{qd}^\delta & L_q^\delta \end{bmatrix} \cdot \frac{d\vec{i}_\mu}{dt}, \quad (6)$$

де динамічний коефіцієнт взаємоіндукції між осями при зміні струму по осі  $d$

$$M_{qd}^\delta = \lim_{\Delta i_{\mu d} \rightarrow 0} \frac{\Delta \psi_{\delta q}}{\Delta i_{\mu d}} = \left( \frac{d\psi_\delta}{dt} - \frac{\psi_\delta}{i_\mu} \right) \cdot \sin \eta_\mu \cdot \cos \eta_\mu = 0.5 \cdot \left( \frac{d\psi_\delta}{dt} - \frac{\psi_\delta}{i_\mu} \right) \cdot \sin 2\eta_\mu = M^\delta, \quad (7)$$

динамічний коефіцієнт самоіндукції контуру по осі  $d$

$$L_d^\delta = \lim_{\Delta i_{\mu d} \rightarrow 0} \frac{\Delta \psi_{\delta d}}{\Delta i_{\mu d}} = \frac{\partial \psi_{\delta d}}{\partial i_{\mu d}} = \frac{d\psi_\delta}{dt} \cdot \cos^2 \eta_\mu + \frac{\psi_\delta}{i_\mu} \cdot \sin^2 \eta_\mu, \quad (8)$$

динамічний коефіцієнт взаємоіндукції між осями при зміні струму по осі  $q$

$$M_{dq}^\delta = \lim_{\Delta i_{\mu q} \rightarrow 0} \frac{\Delta \psi_{\delta d}}{\Delta i_{\mu q}} = \left( \frac{d\psi_\delta}{dt} - \frac{\psi_\delta}{i_\mu} \right) \cdot \sin \eta_\mu \cdot \cos \eta_\mu = 0.5 \cdot \left( \frac{d\psi_\delta}{dt} - \frac{\psi_\delta}{i_\mu} \right) \cdot \sin 2\eta_\mu = M^\delta, \quad (9)$$

динамічний коефіцієнт самоіндукції контуру по осі  $q$

$$L_q^\delta = \lim_{\Delta i_{\mu q} \rightarrow 0} \frac{\Delta \psi_{\delta q}}{\Delta i_{\mu q}} = \frac{\partial \psi_{\delta q}}{\partial i_{\mu q}} = \frac{d\psi_\delta}{dt} \cdot \sin^2 \eta_\mu + \frac{\psi_\delta}{i_\mu} \cdot \cos^2 \eta_\mu, \quad (10)$$

де  $\eta_\mu$  - кут повороту системи координат проєкцій вектора намагнічування відносно базисної системи координат.

Для проєкцій узагальненого вектора поточозчеплення на осі системи координат ( $d$ ,  $q$ ) мають місце наступні співвідношення:

$$\psi_{sd} = \psi_{\sigma sd} + \psi_{\delta d}; \quad (11)$$

$$\psi_{sq} = \psi_{\sigma sq} + \psi_{\delta q}; \quad (12)$$

$$\psi_{rd} = \psi_{\sigma rd} + \psi_{\delta d}; \quad (13)$$

$$\psi_{rq} = \psi_{\sigma rq} + \psi_{\delta q}. \quad (14)$$

В рівняннях (11) - (14) через  $\psi_{\sigma s, r(d, q)}$  позначено відповідні проекції узагальнених векторів потокозчеплення розсіювання статора та ротора, пов'язаних з дією сталих індуктивностей розсіювання обмоток статора  $L_{\sigma s}$  та ротора  $L_{\sigma r}$  відповідно.

Для проекцій узагальненого вектора струму намагнічування  $\vec{i}_\mu$  на осі системи координат  $(d, q)$  мають місце співвідношення:

$$i_{\mu d} = i_{sd} + i_{rd}; \quad (15)$$

$$i_{\mu q} = i_{sq} + i_{rq}. \quad (16)$$

Розглянемо проекції узагальненого вектора струму намагнічування  $\vec{i}_\mu$  на осі системи координат  $(d, q)$ :

$$i_{\mu d} = i_\mu \cdot \frac{\psi_{\delta d}}{\psi_\delta}; \quad (17)$$

$$i_{\mu q} = i_\mu \cdot \frac{\psi_{\delta q}}{\psi_\delta}. \quad (18)$$

Модуль просторового вектора робочого потокозчеплення складає

$$\psi_\delta = \sqrt{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2}. \quad (19)$$

Знайдемо диференціал за часом від виразів (15) та (16), використовуючи вирази (17) та (18):

$$\frac{di_{\mu d}}{dt} = \frac{di_{sd}}{dt} + \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{di_\mu}{dt} \cdot \frac{\psi_{\delta d}}{\psi_\delta} + \frac{d}{dt} \left( \frac{\psi_{\delta d}}{\psi_\delta} \right) \cdot i_\mu; \quad (20)$$

$$\frac{di_{\mu q}}{dt} = \frac{di_{sq}}{dt} + \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{di_\mu}{dt} \cdot \frac{\psi_{\delta q}}{\psi_\delta} + \frac{d}{dt} \left( \frac{\psi_{\delta q}}{\psi_\delta} \right) \cdot i_\mu. \quad (21)$$

У виразах (20), (21) значення похідних можна знайти наступним чином:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\psi_{\delta d}}{\psi_{\delta}} \right) = \frac{\psi_{\delta} \cdot \frac{d\psi_{\delta d}}{dt} - \psi_{\delta d} \cdot \frac{d\psi_{\delta}}{dt}}{\psi_{\delta}^2}; \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\psi_{\delta q}}{\psi_{\delta}} \right) = \frac{\psi_{\delta} \cdot \frac{d\psi_{\delta q}}{dt} - \psi_{\delta q} \cdot \frac{d\psi_{\delta}}{dt}}{\psi_{\delta}^2}. \quad (23)$$

Тоді матимемо наступне:

$$\frac{di_{\mu}}{dt} = \frac{di_{\mu}}{d\psi_{\delta}} \cdot \frac{d\psi_{\delta}}{dt}. \quad (24)$$

В роботі [1] введено поняття радіальної динамічної індуктивності, що дорівнює границі відношення прирощення модуля робочого потокозчеплення до прирощення намагнічуючого струму, якщо останнє прямує до нуля і напрямок його співпадає з напрямком намагнічуючого струму:

$$L_{\rho}^{\delta} = \frac{d\psi_{\delta}}{di_{\mu}}. \quad (25)$$

Також в роботі [1] введено поняття тангенціальної динамічної індуктивності, що являє собою границю відношення прирощення робочого потокозчеплення до прирощення намагнічуючого струму, якщо останнє прямує до нуля таким чином, що модуль вектора намагнічуючого струму залишається незмінним:

$$L_{\tau}^{\delta} = \frac{\psi_{\delta}}{i_{\mu}}. \quad (26)$$

В роботах [7, 8] запропоновано, для спрощення форми запису повної математичної моделі асинхронного двигуна, використовувати величини, зворотні до радіальної динамічної індуктивності:

$$Y_{\rho}^{\delta} = \frac{1}{L_{\rho}^{\delta}} = \frac{di_{\mu}}{d\psi_{\delta}}, \quad (27)$$

та тангенціальної динамічної індуктивності:

$$Y_{\tau}^{\partial} = \frac{1}{L_{\tau}^{\partial}} = \frac{i_{\mu}}{\psi_{\delta}}. \quad (28)$$

Відповідно до дослідження [9], можна наново виразити величини, зворотні до тангенціальної динамічної індуктивності:

$$Y_{\tau n}^{\partial} = \frac{i_{\mu}}{\psi_{\delta}} = \frac{i_{\mu}}{\xi_1 \cdot i_{\mu} - \xi_2 \cdot i_{\mu}^3 + \xi_3 \cdot i_{\mu}^5} = \left( \xi_1 - \xi_2 \cdot i_{\mu}^2 + \xi_3 \cdot i_{\mu}^4 \right)^{-1}, \quad (29)$$

тобто має місце вираз

$$L_{\tau n}^{\partial} = \xi_1 - \xi_2 \cdot i_{\mu}^2 + \xi_3 \cdot i_{\mu}^4, \quad (30)$$

де  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  - параметри асинхронної машини, що враховують дію насичення [9].

Знайдемо також радіальну динамічну індуктивність

$$L_{\rho n}^{\partial} = \frac{d\psi_{\delta}}{di_{\mu}} = \xi_1 - 3 \cdot \xi_2 \cdot i_{\mu}^2 + 5 \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4. \quad (31)$$

Тоді на основі виразу (31) можна записати:

$$Y_{\rho n}^{\partial} = \frac{1}{\xi_1 - 3 \cdot \xi_2 \cdot i_{\mu}^2 + 5 \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4} = \left( \xi_1 - 3 \cdot \xi_2 \cdot i_{\mu}^2 + 5 \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4 \right)^{-1}. \quad (32)$$

Приведемо рівняння математичної моделі асинхронного двигуна з урахуванням дії динамічних індуктивностей та намагнічування:

$$\frac{di_{sd}}{dt} + \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{d\psi_{\delta d}}{dt} \cdot \left( (Y_{\rho}^{\partial} - Y_{\tau}^{\partial}) \cdot \frac{\psi_{\delta d}^2}{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2} + Y_{\tau}^{\partial} \right) + \frac{d\psi_{\delta q}}{dt} \cdot \left( (Y_{\rho}^{\partial} - Y_{\tau}^{\partial}) \cdot \frac{\psi_{\delta q} \cdot \psi_{\delta d}}{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2} \right); \quad (33)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} + \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{d\psi_{\delta d}}{dt} \cdot \left( (Y_{\rho}^{\delta} - Y_{\tau}^{\delta}) \cdot \frac{\psi_{\delta d} \cdot \psi_{\delta q}}{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2} + Y_{\tau}^{\delta} \right) + \frac{d\psi_{\delta q}}{dt} \cdot \left( (Y_{\rho}^{\delta} - Y_{\tau}^{\delta}) \cdot \frac{\psi_{\delta q}^2}{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2} + Y_{\tau}^{\delta} \right). \quad (34)$$

Введемо наступні позначення:

$$n_{11} = \left( (Y_{\rho}^{\delta} - Y_{\tau}^{\delta}) \cdot \frac{\psi_{\delta d}^2}{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2} + Y_{\tau}^{\delta} \right); \quad (35)$$

$$n_{12} = \left( (Y_{\rho}^{\delta} - Y_{\tau}^{\delta}) \cdot \frac{\psi_{\delta q} \cdot \psi_{\delta d}}{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2} \right); \quad (36)$$

$$n_{21} = \left( (Y_{\rho}^{\delta} - Y_{\tau}^{\delta}) \cdot \frac{\psi_{\delta d} \cdot \psi_{\delta q}}{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2} + Y_{\tau}^{\delta} \right) = n_{12} + Y_{\tau}^{\delta}; \quad (37)$$

$$n_{22} = \left( (Y_{\rho}^{\delta} - Y_{\tau}^{\delta}) \cdot \frac{\psi_{\delta q}^2}{\psi_{\delta d}^2 + \psi_{\delta q}^2} + Y_{\tau}^{\delta} \right). \quad (38)$$

Тоді будемо мати наступне:

$$\frac{di_{sd}}{dt} + \frac{di_{rd}}{dt} = n_{11} \frac{d\psi_{\delta d}}{dt} + n_{12} \frac{d\psi_{\delta q}}{dt}; \quad (39)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} + \frac{di_{rq}}{dt} = n_{21} \frac{d\psi_{\delta d}}{dt} + n_{22} \frac{d\psi_{\delta q}}{dt}. \quad (40)$$

Використовуючи останні вирази можна розрахувати коефіцієнти [6-8], що дають змогу розрахувати параметри математичної моделі тягового асинхронного двигуна:

$$n_{11n} = \frac{\xi_1 \cdot \psi_{\delta}^2 + (2 \cdot \psi_{\delta d}^2 - 3 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_2 \cdot i_{\mu}^2 - (4 \cdot \psi_{\delta d}^2 - 5 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4}{\psi_{\delta}^2 \cdot L_{\rho n}^{\delta} \cdot L_{\tau n}^{\delta}} - \frac{(4 \cdot \psi_{\delta d}^2 - 5 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4}{\psi_{\delta}^2 \cdot L_{\rho n}^{\delta} \cdot L_{\tau n}^{\delta}}, \quad (41)$$

$$n_{12n} = \frac{2 \cdot \xi_2 \cdot \psi_{\delta d} \cdot \psi_{\delta q} i_{\mu}^2 - 4 \cdot \xi_3 \cdot \psi_{\delta d} \cdot \psi_{\delta q} i_{\mu}^4}{\psi_{\delta}^2 \cdot L_{\rho n}^{\delta} \cdot L_{\tau n}^{\delta}}; \quad (42)$$

$$n_{21n} = \frac{\xi_1 \cdot \psi_{\delta}^2 + (2 \cdot \psi_{\delta d} \cdot \psi_{\delta q} - 3 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_2 \cdot i_{\mu}^2 - (4 \cdot \psi_{\delta d} \cdot \psi_{\delta q} - 5 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4}{\psi_{\delta}^2 \cdot L_{\rho n}^{\delta} \cdot L_{\tau n}^{\delta}} - \frac{(4 \cdot \psi_{\delta d} \cdot \psi_{\delta q} - 5 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4}{\psi_{\delta}^2 \cdot L_{\rho n}^{\delta} \cdot L_{\tau n}^{\delta}}; \quad (43)$$

$$n_{22n} = \frac{\xi_1 \cdot \psi_{\delta}^2 + (2 \cdot \psi_{\delta q}^2 - 3 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_2 \cdot i_{\mu}^2 - (4 \cdot \psi_{\delta q}^2 - 5 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4}{\psi_{\delta}^2 \cdot L_{\rho n}^{\delta} \cdot L_{\tau n}^{\delta}} - \frac{(4 \cdot \psi_{\delta q}^2 - 5 \cdot \psi_{\delta}^2) \cdot \xi_3 \cdot i_{\mu}^4}{\psi_{\delta}^2 \cdot L_{\rho n}^{\delta} \cdot L_{\tau n}^{\delta}}. \quad (44)$$



Наведена математична модель є універсальною, бо рівняння записані для використання у відносних одиницях з базисними величинами, що розраховані на основі даних про асинхронний двигун.

**Наукова новизна.** 1. Вперше встановлена математична залежність між динамічними індуктивностями асинхронної машини та параметрами насичення двигуна.

2. Уточнено математичну модель асинхронної машини в координатах  $(d, q)$ , жорстко пов'язаній з ротором тягового асинхронного двигуна.

## ВИСНОВКИ

1. Отримані аналітичні вирази дозволяють встановити математичну залежність між динамічними індуктивностями асинхронної машини та параметрами насичення асинхронного двигуна.

2. Використання отриманих залежностей при побудові математичної моделі електроприводу дозволить проводити розрахунок тангенціальної та радіальної динамічної індуктивностей асинхронної машини адекватно реальним фізичним процесам насичення, що відбуваються у асинхронному двигуні.

3. Подальші перспективи дослідження у даному напрямку полягатимуть в уточненні способів апроксимації наведених коефіцієнтів, використанні нових методів врахування насичення та більш детальному описі математичної моделі асинхронного електроприводу для досягнення високої ідентичності реальним фізичним процесам.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фильц Р. В. Дифференциальные уравнения напряжений насыщенных неявнополюсных машин переменного тока / Р. В. Фильц // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1966. – № 11. – С. 1195-1203.

2. Boldea I. Induction Machines Handbook / Ion Boldea, Syed A. Nasar. – CRC Press Boca Raton : London, New York, Washington, D.C, 2002. – 845 p.

3. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 320 С.

4. Мищенко В. А. Теория, способы и системы векторного и оптимального векторного управления электроприводами переменного тока. Монография / Мищенко В. А. – М. : Издательство «Информэлектро», 2002. – 168 С.

5. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией / Пивняк Г. Г., Волков А. В. – Днепропетровск, 2006. – 421 С.

6. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія / Дмитро Олександрович Кулагін. – Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 С.

7. Беспалов Б. Я. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат / Беспалов Б. Я., Мощинский Ю. А., Петров А. П. // Электричество. – 2002. – №8. – С. 33-39.

8. Снегирев Д. А. Дифференциальные уравнения для исследования электромагнитных переходных процессов частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом насыщения / Снегирёв Д. А., Тикунов А. В. // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – №2. – С. 69-73.

9. Кулагін Д. О. Спосіб апроксимації кривої намагнічування тягового асинхронного двигуна / Кулагін Д. О. // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. – №2. – С. 66-70.

10. Попович О. М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання / О. М. Попович // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 4. – С.25-32.

11. Попович О. М. Математична модель для розрахунку пускових характеристик асинхронного двигуна з урахуванням еквівалентних контурів втрат в сталі статора і ротора / Попович О. М., Головань І. В. // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 1. – С.42–46.

**Кулагин Д. А. Определение динамических индуктивностей асинхронного двигателя с учетом процессов насыщения**

*Проведено исследование способа установления математической зависимости между динамическими индуктивностями асинхронной машины и параметрами насыщения двигателя, что является необходимым при оптимизации энергетических характеристик в зависимости от нагрузки на электропривод при работе с пониженным значением модуля вектора потокосцепления ротора. Проведенное исследование выполнено в общем виде, что позволяет использовать его результаты для асинхронных двигателей различных серий.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, намагничивание, потокосцепление, индуктивность, насыщение, математическая модель.

**Kulagin D.O. Definition of dynamic inductances of the asynchronous engine with regard to processes of saturation**

*Development of mathematical model of asynchronous machines in  $(d,q)$  coordinate system with taking into account the saturation of magnetic circuits. In the paper, we used the method of dynamic inductances, which is connected with the use of a systematic study of properties of the*

*motor. An analytical model of magnetic circuit asynchronous motor, which is taken into account action of the tangential and radial dynamic inductances. On the basis of this built tensor dynamic inductances rich machine, which was recorded in (d,q) coordinate system of equations of rotor and stator circles asynchronous motor taking into account the saturation. The author suggests using the method of dynamic inductances at construction of mathematical model asynchronous engine, that allows to take into account the saturation of the main magnetic path for the modes with a wide range of changes in the flow of mutual induction between the stator and the rotor, saturation flow path, the scattering modes that are characterized by large current circuits of the machine, induction, due to processes of saturation, between mutually perpendicular to the contours of the machine, as well as the joint saturation worker thread and threads scattering modes that are characterized by the significant size of the workflow and large values of currents contours of the machine. The mathematical model allows to take into account the change of the magnetic state of asynchronous motor is necessary to build adequate systems of control drives and driving.*

**Keywords:** *asynchronous motor, magnetization, magnetic, inductance, saturation, mathematical model.*

## REFERENCES

1. Fil'ts R. V. Differential equations stress saturated not- brushless DC AC machines / R. V. Fil'ts // *Izvestiya VUZov. Elektromekhanika*. – 1966. – № 11. – pp. 1195-1203.
2. Boldea I. *Induction Machines Handbook* / Ion Boldea, Syed A. Nasar. – CRC Press Boca Raton : London, New York, Washington, D.C, 2002. – 845 p.
3. Vinogradov A. B. *Vector control of AC electric drives* / A. B. Vinogradov. – GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet im. V.I. Lenina». – Ivanovo, 2008. – 320 p.
4. Mishchenko V. A. *Theory, methods and systems of the vector and the optimal vector control electric drives of an alternating current. Monograph* / Mishchenko V. A. – M. : Izdatel'stvo «Informelektro», 2002. – 168 p.
5. Pivnyak G. G. *Modern frequency-controlled asynchronous electric drives with pulse-width modulation* / Pivnyak G. G., Volkov A. V. – Dnepropetrovsk, 2006. – 421 p.
6. Kulagin D. O. *Designing of control systems of traction electrical transmission of EMU-trains : monograph* / Kulagin D. O. – Berdyansk : FO-P Tkachuk O. V., 2014. – 154 p.
7. Bespalov B. Ya. *Mathematical model of the induction motor in a generalized orthogonal coordinate system* / Bespalov B. Ya., Moshchinskiy Yu. A., Petrov A. P. // *Elektrichestvo*. – 2002. – №8. – pp. 33-39.

8. Snegirev D. A. Differential equations for research of electromagnetic transients of frequency-controlled asynchronous motor with taking into account the saturation / Snegirev D. A., Tikunov A. V. // Elektrotehnicheskie komplekxy i sistemy upravleniya. – 2006. – №2. – pp. 69-73.
9. Kulagin D. O. The method of approximation of a curve of magnetization asynchronous traction motor / Kulagin D. O. // Elektrotehnika ta elektroenergetyka. – 2013. – №2. – pp. 66-70.
10. Popovych O. M. The mathematical model of asynchronous machines elektromechaniczne system for simulation and structural modeling / O. M. Popovych // Tehnichna elektrodynamika. – 2010. – № 4. – pp.25-32.
11. Popovych O. M. Mathematical model for calculation of the starting characteristics of the asynchronous engine with regard equivalent circuits losses in steel stator and rotor / Popovych O. M., Golovan' I. V. // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2006. – № 1. – pp.42–46.