

казано, що системи індивідуального опалення при існуючому зносі теплових мереж можуть становити суттєву конкуренцію централізованому опаленню. Впровадження систем опалення з альтернативними джерелами тепла дозволить шляхом управління структурою цих систем оптимізувати завдання тепlopостачання міських районів. При цьому висока ефективність процесу тепlopостачання забезпечується не просто вибором максимально ефективного джерела тепла, а вибором джерела, що забезпечує в даний момент часу теплову енергію з мінімальною собівартістю.

*Ключові слова:* система опалення, тепла мережа, розподіл тепла, управління структурою.

*S.V. Babich, V.O. Davydov. Анализ экономической эффективности систем теплоснабжения городских районов.* Отопительная система современного украинского города предоставляет среднему потребителю ограниченный выбор: либо централизованное отопление; либо индивидуальное отопление на основе газовых котлов. В редких случаях индивидуальные системы отопления дополнительно комплектуются тепловыми насосами. Переход от использования единичного источника тепловой энергии к суперпозиции двух и более альтернативных источников позволяет сформулировать и решить задачу оптимизации теплоснабжения городских районов. В данной работе проведена оценка себестоимости тепловой энергии, получаемой от различных источников. Показано, что системы индивидуального отопления при существующем износе тепловых сетей могут составлять существенную конкуренцию централизованному отоплению. Внедрение систем отопления с альтернативными источниками тепла позволит путем управления структурой этих систем оптимизировать задачу теплоснабжения городских районов. При этом высокая эффективность процесса теплоснабжения обеспечивается не просто выбором максимально эффективного источника тепла, а выбором источника, обеспечивающего в данный момент времени тепловую энергию с минимальной себестоимостью.

*Ключевые слова:* система отопления, тепловая сеть, распределение тепла, управление структурой.

*S.V. Babich, V.O. Davydov. Analysis of economic efficiency of heat supply systems of city districts.* The heat supply system of a contemporary Ukrainian city provides an average consumer with a limited choice: either the centralized heating, or individual heating on the basis of gas boilers. In rare instances individual heat supply systems are additionally completed with thermal pumps. Transition from the use of a single source of thermal energy to superposition of two and more alternative sources allows to formulate and solve a problem of optimization of city districts heat supply. In this work the assessment of prime cost of thermal energy received from various sources is carried out. It is shown that individual heat supply systems under the existing wear of thermal networks can become quite competitive to the centralized heat supply systems. Meanwhile, high efficiency of the heat supply process can be provided not simply by choosing the most effective source of heat, but by choosing the source providing thermal energy with the minimum prime cost at the moment.

*Keywords:* heat supply system, thermal network, heat distribution, management of structure.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Максимов М.В.

Поступила в редакцию 24 апреля 2014 г.

УДК 621.313.33:629.423.24

Д.О. Кулагін, канд. техн. наук, доц., Запорізь. нац. техн. ун-т

## ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ НАСИЧЕННЯ МАГНІТНИХ КІЛ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЯГОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

**Вступ.** В залежності від багатьох обставин для досягнення оптимальних режимів роботи тягових асинхронних двигунів, з метою отримання кутових швидкостей обертання таких двигунів вище за номінальну, при оптимізації енергетичних характеристик тягової електропередачі в залежності від навантаження на тягову передачу та при оптимізації динамічних характерис-

DOI: 10.15276/opu.1.43.2014.25

© Д.О. Кулагін, 2014

тик електрорухомого складу залізниць 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...4]. Для роторів тягових електричних машин змінного струму часто характерна електрична або магнітна несиметричність, тобто різна магнітна провідність в двох взаємно перпендикулярних напрямках — поздовжній та поперечній. Відповідно до цього розрізняють нерівні одна одній повні опори роторних обмоток у поздовжній та поперечній осях [5, 6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для врахування насичення перспективним до використання є метод динамічних індуктивностей [7, 8], який дозволяє врахувати:

- насичення головного магнітного шляху для режимів з широким діапазоном зміни потоку взаємодукації між статором та ротором;
- насичення шляхів потоків розсіювання для режимів, що характеризуються значними струмами контурів машини;
- взаємодукацію, зумовлену процесами насичення, між взаємно перпендикулярними контурами машини;
- сумісне насичення робочим потоком та потоками розсіювання для режимів, що характеризуються значною величиною робочого потоку та великими значеннями струмів контурів машини.

Метод, дозволяє у зручній формі описати динаміку асинхронної машини та врахувати значну кількість процесів, що відбуваються у двигуні при насиченні [7...10]. Далі, з огляду на це, будемо використовувати саме його.

**Метою дослідження** є врахування впливу процесів насичення магнітних кіл на характеристики тягових асинхронних машин.

**Викладення основного матеріалу.** Проекції векторів потокозчеплення статора  $\vec{\psi}_s$  та потокозчеплення ротора  $\vec{\psi}_r$  двигуна на відповідні осі системи координат  $(d, q)$  можна визначити [4] як

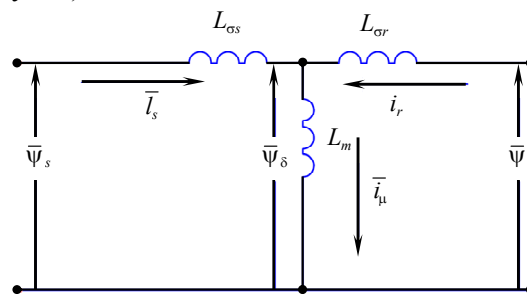
$$\begin{cases} \psi_{sd} = i_{sd}L_{\sigma s} + i_{rd}L_m; \\ \psi_{sq} = i_{sq}L_{\sigma s} + i_{rq}L_m; \\ \psi_{rd} = i_{sd}L_m + i_{rd}L_{\sigma r}; \\ \psi_{rq} = i_{sq}L_m + i_{rq}L_{\sigma r}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$  — власні індуктивності статора і ротора;

$L_m$  — взаємна індуктивність статора і ротора;

$i_{sd}, i_{sq}$  — проекції вектора струму намагнічування.

Для системи (1) складається еквівалентна схема електромагнітних контурів тягового асинхронного двигуна (див. рисунок).



Еквівалентна схема електромагнітних контурів тягового асинхронного двигуна

За припущення, що модуль вектора потокозчеплення в повітряному зазорі  $\psi_\delta$  залежить від величини результуючої магніторушійної сили (МРС), або від пропорційного їй модуля вектора

струму намагнічування  $i_\mu$  [7], при виході на нелінійну ділянку кривої намагнічування приріст струму намагнічування  $\Delta i_\mu$  по одній осі системи координат призводить до відповідного прирощення потокозчеплення  $\Delta \Psi_\delta$  по всіх осях системи. Як наслідок виникає потреба введення до системи динамічних індуктивностей по осях системи та елементів зі взаємною індуктивністю між осями, які залежать від приросту модулів векторів потокозчеплення  $\Delta \Psi_\delta$  і струму намагнічування  $\Delta i_\mu$ , значень самих модулів векторів  $\Psi_\delta$  та  $i_\mu$ , кута, який визначається взаємним розташуванням проєкцій узагальненого вектора намагнічуючого струму на відповідні осі  $\eta_\mu = \arctg\left(\frac{i_{\mu d}}{i_{\mu q}}\right)$ .

У відповідності до вказаного припущення

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

Похідна вектора робочого потокозчеплення

$$\frac{d\vec{\Psi}_\delta}{dt} = \frac{d\vec{\Psi}_\delta}{d\vec{i}_\mu} \frac{d\vec{i}_\mu}{dt} = L^\circ \frac{d\vec{i}_\mu}{dt} = \begin{bmatrix} L_d^\circ & M_{dq}^\circ \\ M_{qd}^\circ & L_q^\circ \end{bmatrix} \frac{d\vec{i}_\mu}{dt},$$

де  $L^\circ$  — 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  $\vec{\Psi}_\delta$ .

Нехай

$$\frac{d\vec{\Psi}_\delta}{dt} = \frac{d\vec{\Psi}_\delta}{d\vec{i}_\mu} \frac{d\vec{i}_\mu}{dt} = L^\circ \frac{d\vec{i}_\mu}{dt} = \begin{bmatrix} L_d^\circ & M_{dq}^\circ \\ M_{qd}^\circ & L_q^\circ \end{bmatrix} \frac{d\vec{i}_\mu}{dt},$$

де  $M_{qd}^\circ$  — динамічний коефіцієнт взаємоіндукції між осями при зміні струму по осі  $d$ ;

$$M_{qd}^\circ = \lim_{\Delta i_{\mu d} \rightarrow 0} \frac{\Delta \Psi_{\delta q}}{\Delta i_{\mu d}} = \frac{\partial \Psi_{\delta q}}{\partial i_{\mu d}} = 0,5 \left( \frac{d\Psi_\delta}{dt} - \frac{\Psi_\delta}{i_\mu} \right) \sin 2\eta_\mu = M^\circ;$$

$L_d^\circ$  — динамічний коефіцієнт самоіндукції контура по осі  $d$ ;

$$L_d^\circ = \lim_{\Delta i_{\mu d} \rightarrow 0} \frac{\Delta \Psi_{\delta d}}{\Delta i_{\mu d}} = \frac{\partial \Psi_{\delta d}}{\partial i_{\mu d}} = \frac{d\Psi_\delta}{dt} \cos^2 \eta_\mu + \frac{\Psi_\delta}{i_\mu} \sin^2 \eta_\mu;$$

$M_{dq}^\circ$  — динамічний коефіцієнт взаємоіндукції між осями при зміні струму по осі  $q$ ;

$$M_{dq}^\circ = \lim_{\Delta i_{\mu q} \rightarrow 0} \frac{\Delta \Psi_{\delta d}}{\Delta i_{\mu q}} = \frac{\partial \Psi_{\delta d}}{\partial i_{\mu q}} = 0,5 \left( \frac{d\Psi_\delta}{dt} - \frac{\Psi_\delta}{i_\mu} \right) \sin 2\eta_\mu = M^\circ;$$

$L_q^\circ$  — динамічний коефіцієнт самоіндукції контура по осі  $q$ ;

$$L_q^\circ = \lim_{\Delta i_{\mu q} \rightarrow 0} \frac{\Delta \Psi_{\delta q}}{\Delta i_{\mu q}} = \frac{\partial \Psi_{\delta q}}{\partial i_{\mu q}} = \frac{d\Psi_\delta}{dt} \sin^2 \eta_\mu + \frac{\Psi_\delta}{i_\mu} \cos^2 \eta_\mu.$$

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

$$\Psi_{sd} = \Psi_{csd} + \Psi_{\delta d}; \quad (2)$$

$$\Psi_{sq} = \Psi_{csq} + \Psi_{\delta q}; \quad (3)$$

$$\Psi_{rd} = \Psi_{\sigma rd} + \Psi_{\delta d}; \quad (4)$$

$$\Psi_{rq} = \Psi_{\sigma rq} + \Psi_{\delta q}. \quad (5)$$

В рівняннях (2)...(5) через  $\Psi_{\sigma s,r(d,q)}$  позначено відповідні проекції узагальнених векторів потокозчеплення розсіювання статора і ротора, пов'язаних з дією сталих індуктивностей розсіювання обмоток статора  $L_{\sigma s}$  і ротора  $L_{\sigma r}$  відповідно. Тобто:

$$\Psi_{\sigma sd} = L_{\sigma s} i_{\sigma sd};$$

$$\Psi_{\sigma sq} = L_{\sigma s} i_{\sigma sq};$$

$$\Psi_{\sigma rd} = L_{\sigma r} i_{\sigma rd};$$

$$\Psi_{\sigma rq} = L_{\sigma r} i_{\sigma rq}.$$

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

$$i_{\mu d} = i_{sd} + i_{rd}; \quad (6)$$

$$i_{\mu q} = i_{sq} + i_{rq}. \quad (7)$$

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

$$i_{\mu d} = i_\mu \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_\delta}; \quad (8)$$

$$i_{\mu q} = i_\mu \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_\delta}. \quad (9)$$

Модуль просторового вектора робочого потокозчеплення

$$\Psi_\delta = \sqrt{\Psi_{\delta d}^2 + \Psi_{\delta q}^2}. \quad (10)$$

Диференціал за часом від виразів (6) і (7), використовуючи (8)...(10), знаходиться як

$$\frac{di_{\mu d}}{dt} = \frac{di_\mu}{dt} \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_\delta} + \frac{d}{dt} \left( \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_\delta} \right) i_\mu; \quad (11)$$

$$\frac{di_{\mu q}}{dt} = \frac{di_\mu}{dt} \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_\delta} + \frac{d}{dt} \left( \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_\delta} \right) i_\mu. \quad (12)$$

У виразах (11), (12) значення похідних на основі теорії диференціювання складних функцій можна знайти як

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_\delta} \right) = \frac{\Psi_\delta \frac{d\Psi_{\delta d}}{dt} - \Psi_{\delta d} \frac{d\Psi_\delta}{dt}}{\Psi_\delta^2}; \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_\delta} \right) = \frac{\Psi_\delta \frac{d\Psi_{\delta q}}{dt} - \Psi_{\delta q} \frac{d\Psi_\delta}{dt}}{\Psi_\delta^2}. \quad (14)$$

Для похідних у виразах (11), (12) можна записати

$$\frac{di_\mu}{dt} = \frac{di_\mu}{d\Psi_\delta} \cdot \frac{d\Psi_\delta}{dt}. \quad (15)$$

Після підстановки (13)...(15) у (11) і (12) отримано

$$\frac{di_{\mu d}}{dt} = \frac{di_{\mu}}{d\psi_{\delta}} \frac{d\psi_{\delta}}{dt} \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_{\delta}} + \left( \frac{1}{\Psi_{\delta}} \frac{d\Psi_{\delta d}}{dt} - \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_{\delta}^2} \frac{d\Psi_{\delta}}{dt} \right) i_{\mu}; \quad (16)$$

$$\frac{di_{\mu q}}{dt} = \frac{di_{\mu}}{d\psi_{\delta}} \frac{d\psi_{\delta}}{dt} \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_{\delta}} + \left( \frac{1}{\Psi_{\delta}} \frac{d\Psi_{\delta q}}{dt} - \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_{\delta}^2} \frac{d\Psi_{\delta}}{dt} \right) i_{\mu}. \quad (17)$$

Введено поняття радіальної динамічної індуктивності, що дорівнює границі відношення прирощення модуля робочого потокозчеплення до прирощення намагнічуючого струму, якщо останнє прямує до нуля і напрямком його співпадає з напрямком намагнічуючого струму [7]

$$L_{\rho}^{\circ} = \frac{d\psi_{\delta}}{di_{\mu}}.$$

В іншій роботі 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 [1]

$$L_{\tau}^{\circ} = \frac{\Psi_{\delta}}{i_{\mu}}.$$

Запропоновано для спрощення форми запису використовувати величини, зворотні до радіальної динамічної індуктивності [6, 7]

$$Y_{\rho}^{\circ} = \frac{1}{L_{\rho}^{\circ}} = \frac{di_{\mu}}{d\psi_{\delta}}, \quad (18)$$

та тангенціальної динамічної індуктивності

$$Y_{\tau}^{\circ} = \frac{1}{L_{\tau}^{\circ}} = \frac{i_{\mu}}{\Psi_{\delta}}. \quad (19)$$

**Результати.** З урахуванням (18), (19) вирази (16), (17) можна записати у вигляді

$$\frac{di_{\mu d}}{dt} = (Y_{\rho}^{\circ} - Y_{\tau}^{\circ}) \frac{d\psi_{\delta}}{dt} \frac{\Psi_{\delta d}}{\Psi_{\delta}} + Y_{\tau}^{\circ} \frac{d\Psi_{\delta d}}{dt}; \quad (20)$$

$$\frac{di_{\mu q}}{dt} = (Y_{\rho}^{\circ} - Y_{\tau}^{\circ}) \frac{d\psi_{\delta}}{dt} \frac{\Psi_{\delta q}}{\Psi_{\delta}} + Y_{\tau}^{\circ} \frac{d\Psi_{\delta q}}{dt}. \quad (21)$$

На основі (10) можна записати

$$\frac{d\psi_{\delta}}{dt} = \frac{\Psi_{\delta d} \frac{d\Psi_{\delta d}}{dt} + \Psi_{\delta q} \frac{d\Psi_{\delta q}}{dt}}{\Psi_{\delta}}. \quad (22)$$

Після підстановки (22) в (20), (21) отримано

$$\frac{di_{\mu d}}{dt} = (Y_{\rho}^{\circ} - Y_{\tau}^{\circ}) \left( \frac{\Psi_{\delta d}^2 \frac{d\Psi_{\delta d}}{dt} + \Psi_{\delta q} \Psi_{\delta d} \frac{d\Psi_{\delta q}}{dt}}{\Psi_{\delta}^2} \right) + Y_{\tau}^{\circ} \frac{d\Psi_{\delta d}}{dt};$$

$$\frac{di_{\mu q}}{dt} = (Y_{\rho}^{\circ} - Y_{\tau}^{\circ}) \left( \frac{\Psi_{\delta d} \Psi_{\delta q} \frac{d\Psi_{\delta d}}{dt} + \Psi_{\delta q}^2 \frac{d\Psi_{\delta q}}{dt}}{\Psi_{\delta}^2} \right) + Y_{\tau}^{\circ} \frac{d\Psi_{\delta q}}{dt}.$$

**Висновки.** Отримані результати дозволяють досить повно та адекватно реальним електромагнітним процесам описувати фізичні процеси в тягових асинхронних машинах. Створена математична модель показує перспективність подальшого дослідження в цьому напрямку для отримання інших співвідношень для тягової асинхронної машини на основі отриманих рівнянь.

### Література

1. Boldea, I. Induction Machines Handbook [Текст] / I. Boldea, S.A. Nasar. — Boca Raton: CRC Press, 2002. — 950 p.
2. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов; Федер. агентство по образованию, Иван. гос. энергет. ун-т им. В.И. Ленина. — Иваново: ИГЭУ, 2008. — 319 с.
3. Мищенко, В.А. Теория, способы и системы векторного и оптимального векторного управления электроприводами переменного тока [Текст] : монография / В.А. Мищенко. — М.: Изд-во “Информэлектрон”, 2002. — 168 с.
4. Пивняк, Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией [Текст]: монография / Г.Г. Пивняк, А.В. Волков; Нац. горн. ун-т. — Днепропетровск: Изд-во Нац. гор. ун-та, 2006. — 470 с.
5. Потапенко, Е.М. Робастные алгоритмы векторного управления асинхронным приводом [Текст] / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко. — Запорожье: ЗНТУ, 2009. — 351 с.
6. Беспалов, В.Я. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат [Текст] / В.Я. Беспалов, Ю.А. Мощинский, А.П. Петров // Электричество: Теорет. и науч.-практ. журн. — 2002. — № 8. — С. 33 — 39.
7. Снегирев, Д.А. Дифференциальные уравнения для исследования электромагнитных переходных процессов частотно-регулируемого асинхронного двигателя с учетом насыщения [Текст] / Д.А. Снегирев, А.В. Тикунов // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2006. — № 2. — С. 69 — 73.
8. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов. — М.: Высшая школа, 2001. — 327 с.
9. Кулагін, Д.О. Розробка моделі модернізованого частотно-керуваного тягового електроприводу зі змінним алгоритмом керування дизель-поїзда ДЕЛ-02 [Текст] / Д.О. Кулагін, О.С. Качур, П.Д. Андрієнко // Електротехніка та електроенергетика. — 2010. — № 1. — С. 30 — 34.
10. Кулагін, Д.О. Двухзонное квазивекторное регулирование скорости вращения тягового двигателя дизель-поезда ДЕЛ-02 [Текст] / Д.О. Кулагін, О.С. Качур, П.Д. Андрієнко // Вісник КДУ ім. М. Острогоградського. — 2010. — № 4(63). — С. 15 — 18.

### References

1. Boldea, I. InductionMachinesHandbook[Текст] / I. Boldea, S.A. Nasar. — Boca Raton: CRC Press, 2002. — 950 p.
2. Vinogradov, A.B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka [Vector control of alternating-current drives] / A.B. Vinogradov; Fed. agentstvo po obrazovaniyu, Ivan. gos. energet. un-t im. V.I. Lenina [Fed. Agency for Education, Ivanovo St. Power Univ. named after V.I. Lenin] — Ivanovo, 2008. — 319 p.
3. Mishchenko, V.A. Teoriya, sposoby i sistemy vektornogo i optimal'nogo vektornogo upravleniya elektroprivodami peremennogo toka: monografiya [Theory, methods and systems of the vector and the optimal vector control of AC drives [Text]: monograph] / V.A. Mishchenko. — Moscow, 2002. — 168 p.
4. Pivnyak, G.G. Sovremennye chastotno-reguliruyemye asinkhronnye elektroprivody s shirotno-impul'snoy modulyatsiyey: monografiya [Modern variable frequency asynchronous electric drives with PWM [Text]: monograph] / G.G. Pivnyak, A.V. Volkov; M-vo obrazovaniya i nauki Ukrainy, Nats. gor. un-t [Ministry of Education and Science of Ukraine, Nat. Mining Univ.] — Dnepropetrovsk, 2006. — 470 p.
5. Potapenko, E.M. Robastnye algoritmy vektornogo upravleniya asinkhronnym privodom [Robust algorithms of asynchronous drive vector control [Text]] / E.M. Potapenko, E.E. Potapenko. — Zaporozh'e, 2009. — 351 p.
6. Bepalov, V.Ya. Matematicheskaya model' asinkhronnogo dvigatelya v obobshchennoy ortogonal'noy sisteme koordinat [A mathematical model of the induction motor in a generalized orthogonal coordinate system [Text]] / V.Ya. Bepalov, Yu.A. Moshchinskiy, A.P. Petrov // Elektrichestvo: Teoret. i nauch.-praktich. zhurnal [Electricity: Theor. and Scientific-Practical Journal]. — 2002. — #8. — pp. 33 — 39.

7. Snegirev, D.A. Differentsial'nye uravneniya dlya issledovaniya elektromagnitnykh perekhodnykh protsessov chastotno-reguliruemogo asinkhronnogo dvigatelya s uchetom nasyshcheniya [Differential equations for investigating the electromagnetic transients of a frequency-controlled induction motor with regard for saturation [Text]] / D.A. Snegirev, A.V. Tikunov // Elektrotehnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya [Electrotechnical Complexes and Control Systems]. — 2006. — #2. — pp. 69 — 73.
8. Kopylov, I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin [Mathematical modeling of electric machines [Text]] / I.P. Kopylov. — Moscow, 2001. — 327 p.
9. Kulahin, D.O. Rozrobka modeli modernizovanoho chastotno-kerovanoho tiahovoho elektropryvo-du zi zminnym alhorytmom keruvannia dyzel-potiaha DEL-02 [Developing a model of a modernized frequency-controlled traction electric drive with a variable algorithm for controlling diesel train DEL-2 [Text]] / D.O. Kulahin, O.S. Kachur, P.D. Andriienko // Elektrotehnika ta elektroenerhetyka [Electrical and Power Engineering]. — 2010. — # 1. — pp. 30 — 34.
10. Kulahin, D.O. Dvozonne kvazivektorne rehuliuвання shvydkosti obertannia tiahovoho dvyhuna dyzel-poizda DEL-02 [Two-zone quasi-vector speed regulation of a traction-engine of a diesel train DEL-02 [Text]] / D.O. Kulahin, O.S. Kachur, P.D. Andriienko // Visnyk KDU im. M. Ostrohradskoho [Bulletin of KDU named after M. Ostrohradskiy]. — 2010. — # 4(63). — pp. 15 — 18.

#### АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

*Д.О. Кулагін.* **Врахування впливу насичення магнітних кіл на механічні характеристики тягових асинхронних двигунів.** Досліджено дію тангенціальної та радіальної динамічної індуктивностей на властивості тягових асинхронних двигунів. Показано можливості використання методу динамічних індуктивностей при побудові математичної моделі тягового асинхронного двигуна. Метою роботи є врахування впливу процесів насичення магнітних кіл на характеристики тягових асинхронних машин. Використано метод динамічних індуктивностей, який поєднано з використанням системного дослідження властивостей тягового асинхронного двигуна, на основі чого створено аналітичну модель магнітних кіл асинхронного тягового двигуна, в якій враховано дію тангенціальної і радіальної динамічної індуктивностей. Обґрунтовано використання методу динамічних індуктивностей при побудові математичної моделі тягового асинхронного двигуна. Створена математична модель дозволяє враховувати зміну магнітного стану тягового асинхронного двигуна, що є необхідним для побудови адекватних систем керування приводами і систем автоведення тягового електродвигуна.

*Ключові слова:* насичення магнітних кіл, магнітне коло, тяговий двигун, метод динамічних індуктивностей.

*Д.А. Кулагин.* **Учет влияния насыщения магнитных цепей на механические характеристики тяговых асинхронных двигателей.** Исследовано действие тангенциальной и радиальной динамической индуктивностей на свойства тяговых асинхронных двигателей. Показаны возможности использования метода динамических индуктивностей при построении математической модели тягового асинхронного двигателя. Целью работы является учет влияния процессов насыщения магнитных цепей на характеристики тяговых асинхронных машин. Использован метод динамических индуктивностей, который соединен с использованием системного исследования свойств тягового асинхронного двигателя, на основе чего создана аналитическая модель магнитных цепей асинхронного тягового двигателя, в которой учтено действие тангенциальной и радиальной динамической индуктивностей. Обосновано использование метода динамических индуктивностей при построении математической модели тягового асинхронного двигателя. Создана математическая модель, учитывающая изменение магнитного состояния тягового асинхронного двигателя, что является необходимым для построения адекватных систем управления приводами и систем автоведения тягового электродвигательного состава железных дорог.

*Ключевые слова:* насыщение магнитных цепей, магнитная цепь, тяговый двигатель, метод динамических индуктивностей.

*D.O. Kulagin.* **Accounting for the effects of saturation of magnetic circuits for the mechanical characteristics of asynchronous traction engines.** The tangential and radial dynamic inductances on properties of asynchronous traction motors are investigated. Possibility of using the method of dynamic inductances at construction of mathematical model of asynchronous traction motor is shown. The aim of the work is to take into account the influence of the processes of saturation of magnetic circuits on the characteristics of asynchronous traction machines. The method of dynamic inductances is used, it is connected with the use of a systematic study of the properties of asynchronous traction motor on the basis of which an analytical model of magnetic circuit asynchronous traction motor is developed. The mathematical model is developed, it allows to take into account changes of the magnetic state of asynchronous traction engine that is necessary for creation of adequate control systems and systems of automatic driving traction electric rolling stock of Railways.

*Keywords:* saturation magnetic circle, magnetic circle, traction motor, the method of dynamic inductances.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Сур'янінов М.Г.

Надійшла до редакції 15 березня 2014 р.