

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Юрій Ромасевич

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 11, Київ, Україна, e-mail: d.um@mail.ru

THE RESEARCH OF ASYNCHRONOUS MOTOR MECHANICAL CHARACTERISTIC MODELS

Yuriy Romasevich

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

АНОТАЦІЯ. У статті проведено аналіз моделей механічних характеристик асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Досліджено статичні та динамічні механічні характеристики двигуна. Динамічна механічна характеристика представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь визначених для обертових координат. Момент опору прийнято ступінчастою функцією. Для аналізу використані кінематичні, динамічні та електричні показники. Встановлено розбіжності у вказаних показниках для різних моделей механічної характеристики. Встановлено рекомендації щодо використання моделей механічних характеристик для різних розрахунків асинхронних приводів.

Ключові слова: асинхронний електропривод, механічна характеристика, модель, пуск, ступінчасте навантаження.

АННОТАЦИЯ. В статье проведен анализ моделей механических характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Исследованы статические и динамические механические характеристики двигателя. Динамическая механическая характеристика представлена в виде системы дифференциальных уравнений определенных для вращающихся координат. Момент сопротивления принят ступенчатой функцией. Для анализа использованы кинематические, динамические и электрические показатели. Установлено расхождения в указанных показателях для разных моделей механической характеристики. Установлены рекомендации относительно использования моделей механических характеристик для разных расчетов асинхронных приводов.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, механическая характеристика, модель, пуск, ступенчатая нагрузка.

SUMMARY. This article analyzes the characteristics of the mechanical models of the asynchronous motor with squirrel-cage rotor. The **purpose** of the study is to establish the reduced degree of adequacy of static and dynamic models of mechanical properties induction motor with squirrel cage. The study used the **method** of numerical integration of the differential equations (Runge-Kutta) of the motion of the electric drive. The **findings** of the work that established the use of the mechanical characteristics of the induction motor (static and dynamic). **Implications:** in the case where the electrical parameters of the induction motor is definite for the dynamic analysis of machinery is desirable to use a dynamic mechanical characteristic of the induction motor; the use of static mechanical characteristic of the induction motor is connected with certain errors during the dynamic analysis of machines. In order to increase the accuracy of modeling the mechanical characteristics of the induction motor is necessary to specify the reference data engine. **Originality:** the above study can be used to refine the engineering methods for calculating transient induction motors.

Key words: asynchronous electric drive, mechanical characteristics, model, start-up, step load.

Подано 14.11.2013; прийнято 28.11.2013

ВСТУП

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (АДКЗ) є найбільш поширеними електричними двигунами у сучасному виробництві. Їхня популярність пояснюється відносно високими енергетичними показниками, надійністю, невибагливістю до умов навколишнього середовища та параметрів мережі живлення; простота підключення та обслуговування також зумовлюють широке поширення АДКЗ.

Велика кількість досліджень з динаміки машин та механізмів ґрунтується на моделюванні механічної характеристики (МХ) АДКЗ за допомогою рівняння Клосса [1]. Зазначимо, що є і інші моделі МХ АДКЗ, які отримали менше поширення. Використання тієї чи іншої моделі МХ АДКЗ у динамічних розрахунках машин значно впливає на характер отриманих результатів. Тому важливою науковою задачею є дослідження моделей МХ АДКЗ та встановлення „найкращої” з тієї чи іншої точки зору.

Існує декілька моделей МХ АДКЗ, які використовуються у дослідженнях. Їх поділяють на статичні та динамічні. Статичні моделі МХ не враховують електромагнітні моменти АДКЗ, що викликані вільними струмами, які протікають у обмотках двигуна під час перехідних процесів. Статичні моделі МХ описуються рівняннями Клосса [1], рівнянням, в яке входять параметри схеми заміщення фази двигуна [1] та сплайново-квадратичною моделлю [2]. Кожна із приведених статичних МХ АДКЗ має власні переваги та недоліки. Наприклад, сплайново-квадратична модель дозволяє отримати розв'язок рівнянь руху приводу, за умови, що всі інерційні елементи машини зведені до вала двигуна [3].

Моделі динамічних МХ АДКЗ [4] характеризуються більшою складністю. Їх використання дає переваги лише у небагатьох випадках, наприклад, при аналізі впливу високочастотних електромагнітних моментів на коливання механічної частини машини чи механізму.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою приведеного дослідження є встановлення ступеня адекватності статичних та динамічної моделей механічної характеристики (МХ) асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (АДКЗ). Для цього необхідно вирішити наступні завдання:

- провести оцінку наявності у технічній літературі параметрів, які включають моделі МХ АДКЗ;
- провести порівняльний аналіз результатів моделювання пуску та ступінчастого навантаження АДКЗ за механічними та електричними показниками;
- вказати рекомендації щодо використання тієї чи іншої МХ АДКЗ.

ВИКЛАД МАТЕРІАЛУ

Як було зазначено, однією з найпоширеніших моделей МХ АДКЗ є рівняння Клосса [1]:

$$M = \frac{2M_{\max}(1 + as_{kp})}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s} + 2as_{kp}}, \quad (1)$$

де M – електромагнітний момент двигуна; M_{\max} – максимальний момент двигуна; s_{kp} – критичне ковзання АДКЗ; s – поточне ковзання двигуна; a – параметр ($a = \frac{R_1}{R_2}$);

R_1 – приведений активний опір статора; R_2' – приведений активний опір ротора. Параметр a для АДКЗ значної потужності можна приблизно вважати рівним нулю. Таким чином, популярність рівняння Клосса (1) у дослідженні динаміки руху машин, які приводяться в рух від АДКЗ, пояснюється простотою запису та невеликою кількістю параметрів у моделі.

У випадку, коли відомі всі параметри схеми заміщення АДКЗ, можна використовувати таке рівняння МХ [1]:

$$M = \frac{3U_{\phi}^2 R_2'}{\omega_0 s \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2}, \quad (2)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга живлення двигуна; ω_0 – кутова швидкість ідеального холостого ходу; X_1 – приведений індуктивний опір статора; X_2' – приведений індуктивний опір ротора.

Необхідно зазначити, що вираз максимального моменту можна знаходити різними способами: за каталожними даними АДКЗ або за допомогою розрахунку за формулою [1], тобто:

$$M_{\max} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left(R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \right)}. \quad (3)$$

Між рівняннями (1) та (2) існує зв'язок: якщо рівняння (2) поділити на формулу (3) і провести перетворення отриманого, то можна знайти вираз (1).

Треба зазначити, що, завод-виготовники наводять величину максимального моменту двигуна (або величину перервантажувальної здатності) у довідниках.

Якщо завод-виготовник наводить координати основних (характерних) точок МХ АДКЗ, то можна використовувати сплайново-квадратичну модель МХ АДКХ [2]. Пе-

реваги та недоліки такої моделі МХ наведені у роботі [3]. Всі описані вище моделі МХ АДКЗ є статичними, тобто вони не відображають електромагнітні моменти, які викликані вільними струмами АДКЗ у перехідних режимах. Для того, щоб отримати динамічну МХ АДКЗ необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь [4]:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1}(u_{1\alpha} - i_{1\alpha}R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1}(u_{1\beta} - i_{1\beta}R_1 - k_r e_{2\beta}); \\ \frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2}((u_{1\alpha} - i_{1\alpha}R_1)k_s + e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2}((u_{1\beta} - i_{1\beta}R_1)k_s - e_{2\beta}); \\ M = \frac{3}{2}pL_{12}(i_{1\beta}i_{2\alpha} - i_{1\alpha}i_{2\beta}), \end{cases} \quad (4)$$

де $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму статора на нерухомі ортогональні координатні осі α і β ; $i_{2\alpha}$, $i_{2\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму ротора на координатні осі α і β ; L_1 , L_2 – індуктивності статорної та роторної обмоток; L_{12} – взаємодукація; k_r і k_s – коефіцієнти магнітного зв'язку ротора та статора відповідно

($k_r = \frac{L_{12}}{L_2}$; $k_s = \frac{L_{12}}{L_1}$); p – кількість пар полюсів електричної машини; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора напруги статора на координатні осі α і β

($u_{1\alpha} = U_{\max} \cos(2\pi f dt)$, $u_{1\beta} = U_{\max} \sin(2\pi f dt)$); U_{\max} – амплітуда фазної напруги живлення двигуна; f – частота напруги живлення двигуна; $e_{2\beta}$, $e_{2\alpha}$ – ЕРС, що індукуються поточкозчепленнями ротора по осях α і β відповідно

($e_{2\alpha} = p\omega_{\delta\delta}(L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}) + i_{2\alpha} R_2$), $e_{2\beta} = p\omega_{\delta\delta}(L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}) + i_{2\beta} R_2$); R_1 – активний опір статорної обмотки; δ – коефіцієнт розсіювання

($\delta = 1 - \left(\left(1 + \frac{X_1}{2\pi f L_{12}} \right) \left(1 + \frac{X_2}{2\pi f L_{12}} \right) \right)^{-1}$).

Система диференціальних рівнянь (4) характеризується наявністю змінних (періодичних) коефіцієнтів, що обумовлені зміною

взаємної індуктивності між обмотками статора та обертового ротора [2]. Для позбавлення періодичних коефіцієнтів у моделі (4) електричні процеси у АДКЗ розглядають у рухомій системі координат, що обертається з кутовою швидкістю, яка дорівнює кутовій швидкості електромагнітного поля [4]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1u}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1\delta}\psi_{1u} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 \delta}\psi_{2u} + 2\pi f \psi_{1v} + U_{\max}; \\ \frac{d\psi_{1v}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1\delta}\psi_{1v} + \frac{R_1 L_{12}}{L_1 L_2 \delta}\psi_{2v} - 2\pi f \psi_{1u}; \\ \frac{d\psi_{2u}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2\delta}\psi_{2u} + \frac{R_2 L_{12}}{L_1 L_2 \delta}\psi_{2v} + (2\pi f - \omega_{\delta\delta} p)\psi_{2v}; \\ \frac{d\psi_{2v}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2\delta}\psi_{2v} + \frac{R_2 L_{12}}{L_1 L_2 \delta}\psi_{1u} - (2\pi f - \omega_{\delta\delta} p)\psi_{2u}; \\ M = \frac{3}{2}p \frac{L_{12}}{L_1 L_2 \delta}(\psi_{1v}\psi_{2u} - \psi_{1u}\psi_{2v}), \end{cases} \quad (5)$$

де ψ_{1u} , ψ_{1v} – потокозчеплення статора у координатах (u-v); ψ_{2u} , ψ_{2v} – потокозчеплення ротора у координатах (u-v); $\omega_{\delta\delta}$ – кутова швидкість двигуна.

Недоліками використання динамічних МХ АДКЗ (4) або (5) є те, що вони поперше містять значну кількість параметрів і по-друге вимагають чисельного інтегрування, що може бути проблематичним. Для деяких серій АДКЗ параметри моделей динамічних МХ не приводяться у довідниках (наприклад індуктивність статорної обмотки), тому використання МХ (4) або (5) вимагає проведення експериментальних досліджень для їхнього визначення, що не завжди можливо. Зазначимо, що для значної кількості АДКЗ (серії 4А, МТК, МТКВ, МТКМ, МТКФ, МТКН) існують довідники [5, 6] в яких наводяться практично всі електричні та механічні параметри двигунів.

Для унаочнення різниці між моделями МХ АДКЗ побудуємо графіки, які їм відповідають для двигуна МТВ611-10 (рис. 1). На рис.1 графік 1 відповідає рівнянню (1), графік 2 – рівнянню (2); графік 3 – системі рівнянь (4).

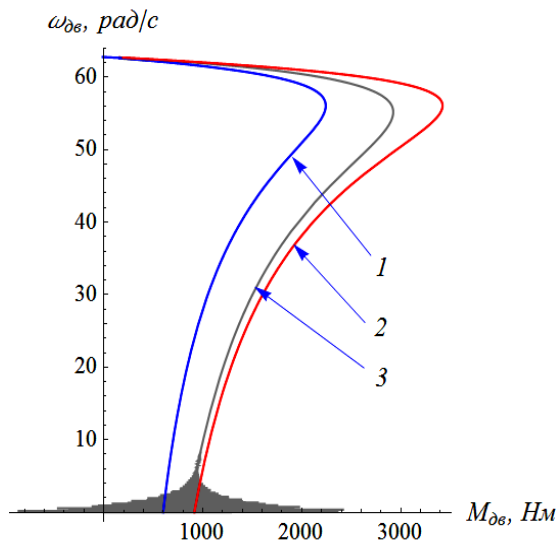


Рис. 1. Графіки МХ АДКЗ для моделей МХ АДКЗ (1), (2) та (4)

Fig. 1. Plots of mechanical characteristics of asynchronous engine for models of mechanical characteristics of asynchronous engine (1), (2) та (4)

Покажемо різницю між моделями МХ АДКЗ. Для цього проведемо моделювання пуску та ступінчастого навантаження АДКЗ. Рівняння руху системи „двигун-навантаження” є диференціальне рівняння, яке має розривну праву частину:

$$\begin{cases} M = J\ddot{\phi} + 0,2M_{on}, & t \in [0, t_{нав}]; \\ M = J\ddot{\phi} + M_{on}, & t \in [t_{нав}, T], \end{cases} \quad (6)$$

де J – приведений до вала двигуна момент інерції системи „двигун-робоча машина”; ϕ – кут повороту вала двигуна; M_{on} – момент опору, який у даному дослідженні прийнятий постійною величиною ($M_{on} = M_{ном}$); t – поточний час; $t_{нав}$ – момент часу початку навантаження двигуна моментом M_{on} .

Приведемо графіки кутової швидкості двигуна, які відповідають розв’язкам диференціального рівняння (6) (рис.2).

На рис.2 графік 1 відповідає рівнянню (1), графік 2 – рівнянню (2); графік 3 – системі рівнянь (4). Тонка чорна лінія на рис.2 відповідає швидкості ідеального холостого ходу АДКЗ.

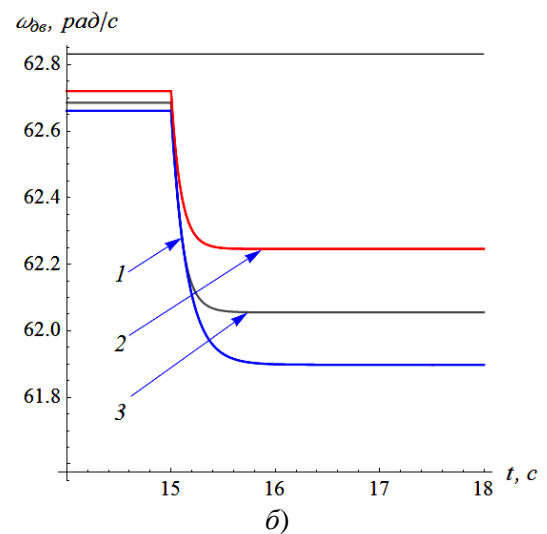
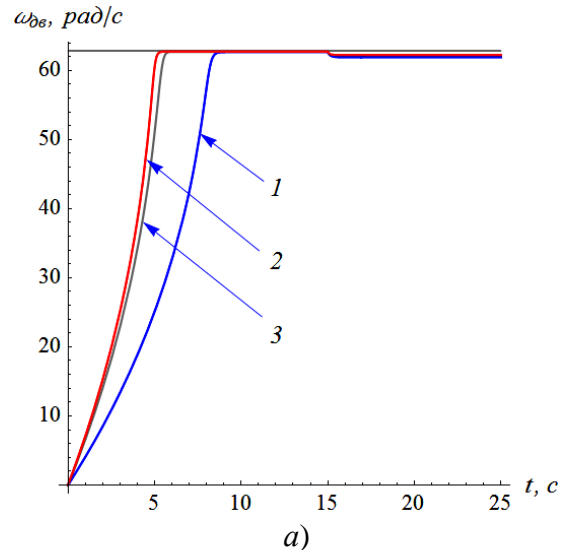
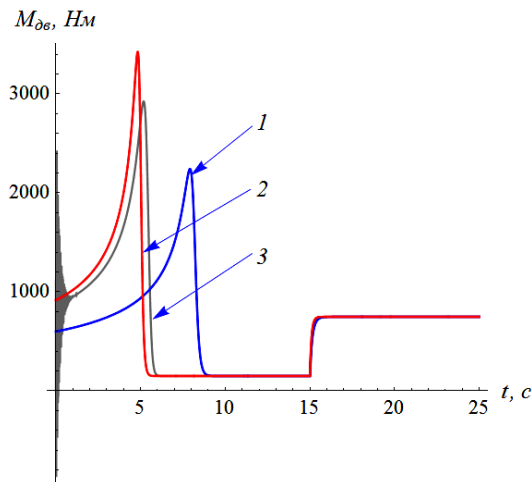


Рис. 2. Графіки кутової швидкості АДКЗ: а - для всього проміжку часу моделювання T ; б- в околі моменту часу $t_{нав}$.

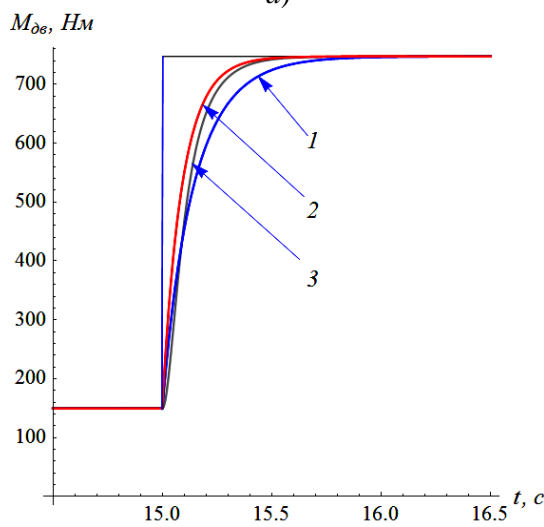
Fig. 2. Plots of rotary speed of asynchronous engine: а- for all modeling time T ; б- near time moment $t_{нав}$.

Як видно з графіків на рис.2 тривалість пуску двигуна при використанні різних моделей МХ АДКЗ є різною. Крім того, при навантаженні двигуна зниження його кутової швидкості також є різною. Це свідчить про те, що для різних моделей різною є жорсткість МХ на її робочій ділянці.

Приведемо графіки для електромагнітного моменту двигуна (рис.3). На рис.3 графік 1 відповідає рівнянню (1), графік 2 – рівнянню (2); графік 3 – системі рівнянь (4). Тонка чорна лінія на рис.3 показує зміну моменту опору M_{on} .



a)



б)

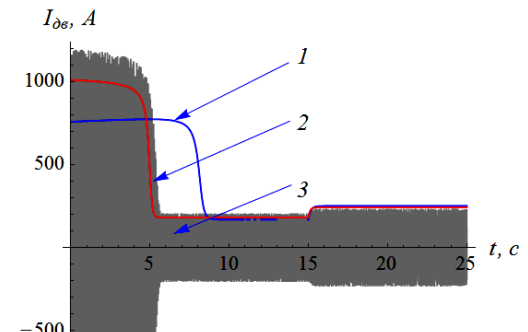
Рис. 3. Графіки електромагнітного моменту АДКЗ: а - для всього проміжку часу моделювання T ; б - в околі моменту часу $t_{нав}$.

Fig. 3. Plots of electromagnetic torque of asynchronous engine: a - for all modeling time T ; б - near time moment $t_{нав}$.

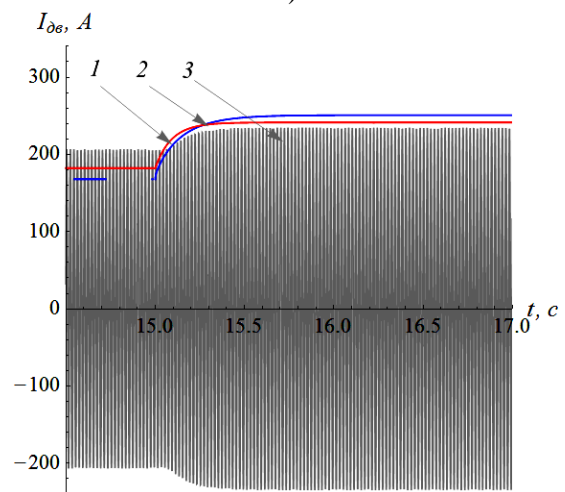
Аналіз графіків на рис.3 показує, що величини максимального моменту для різних моделей МХ АДКЗ мають значні розходження. Так кратність максимального моменту АДКЗ для моделі МХ (1) рівна 3 (паспортна величина); для моделі МХ (2) – 4,58; для моделі МХ (4) – 3,91.

Крім того, моменти часу, коли на валу двигуна виникає максимальний момент також різні: для моделей МХ (2) та (4) вони мало відрізняються, чого не можна сказати про модель МХ (1) – тут двигун розганяється повільніше і тому максимальний момент виникає пізніше.

Зараз проаналізуємо характер зміни електричного струму, який протікає по обмоткам АДКЗ. Для цього побудуємо графіки струму (рис. 4).



a)



б)

Рис. 4. Графіки електромагнітного моменту АДКЗ: а - для всього проміжку часу моделювання T ; б - в околі моменту часу $t_{нав}$.

Fig. 4. Plots of electromagnetic torque of asynchronous engine: a - for all modeling time T ; б - near time moment $t_{нав}$.

На рис. 4 графік 1 відповідає рівнянню (1), графік 2 – рівнянню (2); графік 3 – системі рівнянь (4). Аналіз графіків на рис.4 показує значну відмінність у величинах пускового (максимального) струму АДКЗ. Кратність пускового струму АДКЗ для моделі МХ (1) дорівнює 7,12; для моделі МХ (2) – 8,29; для моделі МХ (4) – 10,34. Що стосується величини струму за номінальним навантаженням, то тут немає значних відмінностей.

ВИСНОВКИ

1. У випадку, коли електричні параметри АДКЗ визначені для проведення динамічних розрахунків машин та механізмів, необхідно використовувати динамічну МХ АДКЗ, яка визначається однією із систем диференціальних рівнянь (4) або (5).
2. Використання статичної МХ АДКЗ пов'язане з певними похибками при проведенні динамічних розрахунків машин.
3. У випадку, коли відомі параметри схеми заміщення АДКЗ при проведенні розрахунків, необхідно віддавати перевагу моделі МХ (3), оскільки вона дає результати „близькі” до результатів, що отримані при використанні моделі динамічної МХ (4).
4. Для того, щоб збільшити точність моделі МХ АДКЗ (1), необхідно уточнювати довідникові дані АДКЗ.
5. Всі моделі МХ АДКЗ, що приведені у даному дослідженні, не враховують провал моменту при невеликій кутовій швидкості двигуна, тому бажано у каталогах на АДКЗ приводити координати характерних та проміжних точок МХ АДКЗ (точок пускового, мінімального та максимального моментів, точок на нестійкій ділянці МХ).

ЛІТЕРАТУРА

1. **Чиликин М.Г.** Общий курс электропривода: учебник [для студ. вузов] / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – [6-е изд., доп. и перераб.]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
2. **Ловейкін В.С.** Сплайново-квадратична модель статичної механічної характеристики асинхронного приводу кранових механізмів / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич // Весник Харьковського національного автомобільно-дорожного університета. Сборник научных трудов. – 2012 – Выпуск 57. – С. 257-263.
3. **Ловейкін В.С.** Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідйомних машин / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич. – К.: ЦП „КОМПРІНТ”, 2012. – 298 с.
4. **Штейнер Р.Т.** Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями

частоты / Р.Т. Штейнер. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

5. **Вешеневский С.Н.** Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.
6. **Кравчик А.Э.** Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

REFERENCES

1. **Chilikin M.G., Sandler A.S., 1981.** Obschiy kurs elektroprivoda [Basic cours of electric drive]. Moskow, Energoizdat Publ., 576.
2. **Loveikin V.S., Romasevich Yu.O., 2012.** Splainivi-kvadraticzna model mehanichnoi harakteristiki asinhronnogo privodu kranovyh mehanizmiv [Splaine-square model of mechanic characteristic of asynchronous drive of crane mechanisms]. Vesnik Harkivskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta, vol. 57, 257-263.
3. **Loveikin V.S., Romasevich Yu.O., 2012.** Analis ta sintez regimiv ruhu mehanizmiv vantagepidyomnih mashin [Analisis and synthesis of motion regimes of load-lifting machines mechanisms]. Kyiv, Comprint Publ., 298.
4. **Shteiner R.T., 2000.** Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateliami chastoty [Mathematical simulation of alternating current electric drive with inverters]. Ekaterinburg, URO RAN, 654.
5. **Veshenevsky S.N., 1977.** Harakteristiki dvigateley v elektroprivode [Drive characteristics in electro drive]. Moskow, Energiya, 432.
6. **Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A., 1982.** Asinhronnie dvigateli serii 4A [Asynchronous engines of 4A series] Moskow. Energoizdat. 504.