

УДК 517.9, 629.42

DOI: 10.20998/2411-0558.2022.02.02

В. Д. ДМИТРІЄНКО, д-р техн. наук., проф., НТУ "ХПІ",
О. Ю. ЗАКОВОРОТНИЙ, д-р техн. наук., проф., НТУ "ХПІ",
М. В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

ЛІНЕАРИЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА МЕТОДАМИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТЕОРІЇ УПРАВЛІННЯ

Необхідність виробництва більш економічного рухомого складу для залізниць України спричинила створення для перевезення пасажирів сучасного дизель-поїзда з тяговим асинхронним приводом та бортовою вимірювально-інформаційною обчислювальною системою, що покращує роботу енергетичного обладнання складу. Зроблено спробу оптимізації законів управління дизель-поїздом за допомогою геометричної теорії управління, яка дозволяє замінити синтез оптимальних законів управління об'єктами, що описуються нелінійними системами звичайних диференціальних рівнянь, лінеаризацією нелінійних систем управління за допомогою зворотного зв'язку та застосуванням добре розробленої теорії управління лінійними системами. Проаналізовано переваги та недоліки зазначеного підходу. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: дизель-поїзд; тяговий асинхронний привід; геометрична теорія управління; лінеаризація нелінійних систем управління за допомогою зворотного зв'язку.

Постановка проблеми і аналіз літератури. Проблема оптимального управління тяговим асинхронним приводом десятиріччями приваблює увагу спеціалістів, що займаються оптимізацією управління силового обладнання тягового рухомого складу. Однак ця проблема досі не вирішена, оскільки тяговий асинхронний привід описується нелінійними системами звичайних диференціальних рівнянь вище третього-четвертого порядку, що помітно ускладнює синтез оптимальних систем управління для таких об'єктів. Неможна стверджувати, що таких методів синтезу зовсім немає, але вони мають помітні недоліки [1 – 5]. У зв'язку з цим спеціалісти по теорії управління нелінійними об'єктами все частіше звертаються до ідей і методів управління лінійними системами, які отримують з нелінійних методом лінеаризації не по Тейлору в околі робочої точки, а методами диференційної геометрії, коли лінеаризація систем управління виконується за допомогою зворотного зв'язку в більш загальних просторах, аніж лінійних просторах, що давно застосовуються [5 – 8].

В теперішній час відомий ряд лінійних математичних моделей асинхронного приводу, отриманих за допомогою лінеаризації зворотним зв'язком [6, 9 – 11]. Однією з перших таких моделей є модель, яка наведена

© В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний, М.В. Мезенцев, 2022

в [6, 9], де в якості вихідної моделі використовувалась модель приводу об'єкта управління:

$$\begin{aligned}\frac{di_{us}}{dt} &= \alpha\beta\Psi_{ur} - \gamma i_{us} + p\beta\Omega\Psi_{vr} + \frac{1}{\sigma L_s}u_{us}; \\ \frac{di_{vs}}{dt} &= \alpha\beta\Psi_{vr} - \gamma i_{vs} - p\beta\Omega\Psi_{ur} + \frac{1}{\sigma L_s}u_{vs}; \\ \frac{d\Psi_{ur}}{dt} &= -\alpha\Psi_{ur} - p\Omega\Psi_{vr} + \alpha L_m i_{us}; \\ \frac{d\Psi_{vr}}{dt} &= -\alpha\Psi_{vr} + p\Omega\Psi_{ur} + \alpha L_m i_{vs};\end{aligned}\tag{1}$$

$$\frac{d\Omega}{dt} = k_1\mu(\Psi_{ur}i_{vs} - \Psi_{vr}i_{us}) - a_{20} - a_{21}\Omega - a_{22}\Omega^2,$$

де i_{us} , i_{vs} – струми статора асинхронного еквівалентного двигуна об'єкта

управління; $\alpha = \frac{1}{T_r}$; T_r – постійна часу ротора тягового еквівалентного

двигуна; $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$; L_m – індуктивність контуру намагнічування;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ – повний коефіцієнт розсіювання; L_s , L_r – відповідно повна

індуктивність статора та ротора електродвигуна; Ψ_{ur} , Ψ_{vr} – відповідно

потокозчеплення ротора за вісями u , v ; $\gamma = \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s}$; R_r , R_s – активні

опори обмоток ротора та статора асинхронного еквівалентного електродвигуна; Ω – кутова швидкість обертання електродвигуна; p –

кількість пар полюсів статора еквівалентного електродвигуна; k_1 , a_{20} ,

a_{21} , a_{22} – постійні коефіцієнти; $\mu = \frac{pL_m}{JL_r}$; J – приведений до валу

двигуна момент інерції об'єкту управління; $M_H = a_{20} + a_{21}\Omega + a_{22}\Omega^2$ – момент навантаження еквівалентного електродвигуна як функція Ω .

Математична модель (1) безпосередньо не може бути використана для лінеаризації моделі дизель-поїзду (1) за допомогою динамічного зворотного зв'язку через ряд причин:

– велику кількість нелінійних одночленів в правих частинах системи рівнянь (1) та, отже, занадто складного процесу отримання рівнянь лінійної

моделі. В зв'язку з цим в роботі [6] було запропоновано, а в роботі [9] уточнено перехід від системи рівнянь (1) до системи рівнянь у обертовій системі координат з меншою кількістю нелінійних одночленів в моделі дизель-поїзду;

– система рівнянь (1) описує привід на основі асинхронного електричного приводу, але це не тяговий привід. Для рішення задач керування тяговим приводом необхідні співвідношення, які описують рух рухомого складу по залізничним коліям. Такі співвідношення були введені частково в роботі [10]. Це привело до збільшення числа диференціальних рівнянь в системі рівнянь (1), зокрема додалося рівняння

$$\frac{dS}{dt} = k\Omega, \quad (2)$$

де S – відстань, що проходить дизель-поїзд від початку перегону (від початку інтервалу оптимального управління); k – постійний коефіцієнт.

– загальний опір руху тягового рухомого складу складається, в першому наближенні, з двох частин – основного та додаткового. Основний опір зазвичай пов'язаний з перевезенням вантажів та пасажирів, а додатковий опір руху рухомого складу пов'язаний з профілем колії – спусками та підйомами залізничного полотна, а також з рухом по дільницях залізниці, де рейки укладені по кривим деяких радіусів.

Цілью статті є удосконалення математичної моделі (1) як задача отримання прийнятної моделі для синтезу еквівалентного лінійного опису об'єкту (1) в формі Бруновського, необхідного для синтезу оптимального регулятора для управління дизель-поїздом, синтез оптимального регулятора та його перевірка шляхом моделювання дизель-поїзду в різноманітних режимах.

Модель для опису руху дизель-поїзда. Для опису за допомогою модифікованої моделі (1) руху дизель-поїзду необхідно, перш за все, в систему рівнянь (1) ввести рівняння (2), за допомогою якого визначається шлях від початку оптимального управління. Оскільки з кожною точкою залізничної колії пов'язано певний закон i і, можливо, радіус R кривої, по якій укладені рейки для переміщення колісних пар, то п'яте рівняння в системі (1) повинно містити і опір руху від ухилів і опір руху складу по кривій будь-якого радіусу. В моделях робіт [9, 10] цей радіус та ухил не враховуються, оскільки вважається, що склад рухається по рівній ділянці залізничної колії. При нульовому уклоні постійний опір руху в п'ятому диференціальному рівнянні системи (1) враховується як частина доданку $r_0 - \alpha_{20}$. П'яте рівняння в системі (1) при описі руху дизель-поїзда з тяговим асинхронним приводом з урахуванням профілю шляху, що

змінюється, в стаціонарній системі координат записується наступним чином:

$$\frac{d\Omega}{dt} = k_1\mu(\Psi_{ur}i_{vs} - \Psi_{vr}i_{us}) - a_{20} - a_{21}\Omega - a_{22}\Omega^2 - a_{22}i_k, \quad (3)$$

де i_k – питомий опір від нахилів та кривих. Введення i_k може дозволити відмовитися від моделювання руху дизель-поїзду тільки по рівним ділянкам залізничної колії. Однак введення в систему рівнянь приводу i_k може значно ускладнити перетворення нелінійної системи рівнянь до форми Бруновського. У зв'язку з цим необхідно оцінити переваги та недоліки введення в систему рівнянь об'єкта (4) питомого опору i_k .

Використовуючи відоме перетворення математичної моделі асинхронного приводу (1) з нерухою системою координат в рухому систему координат $(d, q, 0)$ з урахуванням рівнянь (2), (3) можна отримати математичну модель тягового приводу в обертовій системі координат [10]:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= k\Omega; \\ \frac{d\Omega}{dt} &= k_1\mu\Psi_d i_q - \alpha_{20} - \alpha_{21}\Omega - \alpha_{22}\Omega^2 - \alpha_{23}i_k; \\ \frac{d\Psi_d}{dt} &= \alpha\Psi_d + \alpha L_m i_d; \\ \frac{di_d}{dt} &= -\gamma i_d + p\Omega i_q + \alpha L_m \frac{i_q^2}{\Psi_d} + \alpha\beta\Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s} u_d; \\ \frac{di_q}{dt} &= -\gamma i_q - p\Omega i_d - \alpha L_m \frac{i_d i_q}{\Psi_d} - p\beta\Omega\Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s} u_q; \\ \frac{d\rho}{dt} &= p\Omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\Psi_d}, \end{aligned} \quad (4)$$

де S – відстань, що відрховується від початку оптимального управління (або від початку перегону) приводом; $k, k_1, a_{20}, a_{21}, a_{22}, a_{23}$ – постійні

коефіцієнти; $\mu = \frac{pL_m}{JL_r}$; $i_q = i_{vs}\cos\rho - i_{us}\sin\rho$, $i_d = i_{us}\cos\rho - i_{vs}\sin\rho$ – струми

статора відповідно по вісям q і d в системі координат $(d, q, 0)$;

$$\rho = \arcsin \frac{\Psi_{vr}}{\sqrt{\Psi_{ur}^2 + \Psi_{vr}^2}} \quad \text{або} \quad \rho = \arccos \frac{\Psi_{ur}}{\sqrt{\Psi_{ur}^2 + \Psi_{vr}^2}}.$$

Введемо у наново отриману модель (4) нові управління u_1 та u_2 , які дозволяють прибрати більшу частину нелінійних одночленів з моделі в обертовій системі координат:

$$\begin{aligned} u_1 &= p\Omega i_q + \alpha L_m \frac{i_q^2}{\Psi_d} + \alpha\beta\Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s}(u_{us}\cos\varphi + u_{vs}\sin\varphi); \\ u_2 &= -p\Omega i_d - \alpha L_m \frac{i_d i_q}{\Psi_d} - p\beta\Omega\Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s}(u_{vs}\cos\varphi + u_{us}\sin\varphi). \end{aligned} \quad (5)$$

В результаті з системи рівнянь (4), що містить в правих частинах своїх рівнянь 7 нелінійних одночленів, отримується система нелінійних рівнянь, яка містить в своїх правих частинах всього три нелінійних одночлена. Визначимо можливість перетворення системи рівнянь (4) з управліннями до лінійної форми Бруновського.

Спочатку визначимо векторні поля $X(x)$, $Y_1(x)$, $Y_2(x)$ [9, 10] для системи рівнянь (4) з управлінням (5) та відношенням (3):

$$\begin{aligned} X(x) &= \begin{pmatrix} f_1 = a_{12}x_2 \\ f_2 = a_{20} + a_{21}x_2 + a_{22}x_2^2 + a_{235}x_3x_5 + a_{23}i_k(x_1) \\ f_3 = a_{31}x_3 + a_{34}x_4 \\ f_4 = a_{41}x_4 \\ f_5 = a_{51}x_5 \\ f_6 = a_{61}x_2 + a_{635}\frac{x_5}{x_3} \end{pmatrix}; \\ Y_1(x) &= |0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0|^T; \quad Y_2(x) = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0|^T, \end{aligned} \quad (6)$$

де $a_{12} = k$, $a_{20}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{235}$ – постійні коефіцієнти; $x_2 = \Omega$; $x_3 = \Psi_d$; $x_4 = i_d$; $x_5 = i_q$; i_k – питомий опір від нахилів, $i_k = i + \omega_R$, i – питомий опір від нахилів, можна розглядати як безперервну функцію від пройденої складом відстані x_1 , а питомий опір від кривих – як кусочно-постійні функції від x_1 . В першому наближенні одночлен $a_{23}i_k(x_1)$ на етапі попередньої обробки даних про шлях прямування складу може бути представлений як деякий поліном фазової координати x_1 або як сума кількох кусочно-безперервних доданків, які залежать від фазової координати x_1 .

Встановимо можливість перетворення системи рівнянь (4) з векторними полями (6) до лінійної форми Бруновського [6 – 10],

визначивши інволютивність розподілів $M^0 = \text{span}\{Y_1, Y_2\}$, $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_x Y_1, L_x Y_2\}$, $M^2 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_x Y_1, L_x Y_2, L_x^2 Y_1, L_x^2 Y_2\}$, де span – лінійна оболонка відповідних векторів в точці x , тобто це мінімальний простір, що породжено цим набором векторів; $L_x Y_1, L_x Y_2$ – похідні Лі векторних полів Y_1 та Y_2 вздовж векторного поля X ; $L_x^2 Y_k = [X, L_x Y_k]$ – дужки Лі від векторних полів $X, L_x Y_k$ [6, 10].

Оскільки вектори Y_1, Y_2 постійні, то розподіл M^0 інволютивний. Для визначення інволютивності розподілів M^1 та M^2 необхідно спочатку обчислити похідні Лі векторних полів Y_1, Y_2 .

$$L_x Y_1 = [X, Y_1] = \frac{\partial Y_1}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} Y_1 = -\frac{\partial X}{\partial x} Y_1 =$$

$$-\begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} & \frac{\partial f_1}{\partial x_5} & \frac{\partial f_1}{\partial x_6} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} & \frac{\partial f_2}{\partial x_5} & \frac{\partial f_2}{\partial x_6} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_6}{\partial x_1} & \frac{\partial f_6}{\partial x_2} & \frac{\partial f_6}{\partial x_3} & \frac{\partial f_6}{\partial x_4} & \frac{\partial f_6}{\partial x_5} & \frac{\partial f_6}{\partial x_6} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} + 2a_{22}x_2 & a_{235} & 0 & a_{235}x_3 & 0 \\ 0 & 0 & a_{31} & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{41} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{51} & 0 \\ 0 & a_{61} & -a_{635} \frac{x_5}{x_3} & 0 & \frac{a_{635}}{x_3} & 0 \end{pmatrix} \cdot$$

$$\cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -a_{34} \\ -a_{41} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$L_x Y_2 = [X, Y_2] = \frac{\partial Y_2}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} Y_2 = -\frac{\partial X}{\partial x} Y_2 = \left| 0, -a_{235}x_3, 0, 0, -a_{31}, -\frac{a_{635}}{x_3} \right|^T.$$

Перевірка інволютивності розподілів M^1 та M^2 показує, що інволютивність розподілу M^2 досягається тільки при введенні в канал з управлінням u_2 двох інтеграторів (двох додаткових фазових координат x_7 , x_8 , що пов'язані з управлінням u_2):

$$x_7 = u_2; \quad \frac{dx_7}{dt} = x_8; \quad \frac{dx_8}{dt} = u_2^*. \quad (7)$$

Це призводить до зміни векторних полів (6):

$$X^*(x^*) = \begin{pmatrix} f_1 = a_{12}x_2 \\ f_2 = a_{20} + a_{21}x_2 + a_{22}x_2^2 + a_{235}x_3x_5 + a_{23}i_k(x_1) \\ f_3 = a_{31}x_3 + a_{34} \\ f_4 = a_{41}x_4 \\ f_5 = a_{51}x_5 \\ f_6 = a_{61}x_2 + a_{635} \\ f_7 = u_2^* \\ f_8 = x_8 \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$Y_1^*(x) = |0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0|^T; \quad Y_2^*(x) = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0|^T.$$

В результаті це надає можливість отримати модель асинхронного електроприводу в лінійній формі Бруновського

$$\begin{aligned} \frac{dy_i}{dt} &= y_{i+1}, \quad i = \overline{1, 7}, \quad i \neq 4; \\ \frac{dy_i}{dt} &= v_k, \quad i = 4, 8, \quad k = i/4, \end{aligned} \quad (9)$$

де y_i – фазові змінні моделі в лінійній формі Бруновського; v_k ($k = 1, 2$) – управління в моделі в лінійній формі Бруновського.

Модель (9) дозволяє використовувати її для визначення оптимальних управлінь за допомогою методів теорії оптимального управління лінійними системами: класичне варіаційне числення, принцип максимуму, рівняння Белмана, аналітичне конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи і т.д. [1, 2, 5, 8]. В роботах [9 – 11] при визначенні оптимальних управлінь при русі дизель-поїзду по рівній ділянці залізничної колії

використовувався принцип максимуму Понтрягіна для першої підсистеми рівнянь (9). Оскільки кожна підсистема рівнянь (9) має чотири рівняння, то з теорії оптимального управління лінійними системами та рішення завдання максимальної швидкодії виходить, що під час руху складу між двома станціями кожне управління може змінюватися не більше трьох разів [9 – 10]. При русі по рівній ділянці залізничної колії при максимальному завантаженні складу рух дизель-поїзда починається з розгону, досягання максимальної швидкості руху на ділянці залізниці, що розглядається, потім рух з цією швидкістю, а після цього – гальмування та зупинка, тобто в цьому випадку спостерігається тільки два інтервали постійної швидкості руху. Регулювання потужності дизеля при зміні профілю ділянки не потребує значних змін та перемикаць контролера машиніста більш ніж на одну-дві позиції. Якщо рух складу здійснюється за змінним профілем ділянки, то потужність дизеля (позиція контролера машиніста), які отримані за принципом максимуму для прямолінійного рівної ділянки при постійній швидкості руху дизель-поїзду необхідно скорегувати на величину, що пов'язана зі зміною опору руху складу від додаткового опору залізничної колії. Таким чином, управління рухом дизель-поїзда буде складатися з двох частин:

$$i_{\text{склад}} = i_{\text{пр.мах}} + i_{\text{кор}},$$

де $i_{\text{склад}}$ – загальна кількість позицій контролера машиніста, що забезпечує рух складу; $i_{\text{пр.мах}}$ – кількість позицій, отриманих за допомогою принципу максимуму для забезпечення руху дизель-поїзду по прямолінійній ділянці залізничної колії з постійною швидкістю; $i_{\text{кор}}$ – кількість позицій контролеру машиніста (потужність дизелю), які необхідні для подолання додаткових опорів руху від зміни уклону залізничної колії та руху складу по рейкам, що укладені по кривим заданих радіусів, що забезпечують рух складу на поворотах або об'їздах яких-то перешкод. Такий спосіб підтримки постійної швидкості руху можливий, але він не застосовується. Як зазначають спеціалісти "рух поїздів з постійною швидкістю має місце лише в рідких випадках, в більшості випадків рух нерівномірний" [14, с. 93]. Це пов'язано з тим, що при розрахунку швидкостей руху складів враховується не тільки поточний стан на залізничній колії, а і те, що буде в майбутньому. Так, наприклад, зайва швидкість складу перед довгим підйомом може означати, що накопичена кінетична енергія складу дозволить подолати підйом без витрат палива на його подолання. Фактично, це управління з заданим інтервалом випередження, коли при розрахунку конкретних управлінь розраховують

наслідки на заданий наперед час та обирають те управління, яке виявить себе як найкраще в майбутньому.

Висновки. Співставлення теорії тягових розрахунків, а також розрахунків, що застосовуються кращими машиністами для визначення руху складів [10, 13 – 15], показує, що існує певний розрив між математичними теоріями управління лінійними та нелінійними об'єктами та практичною теорією тягових розрахунків, що застосовуються на залізничному транспорті. Ряд класичних методів лінійної теорії управління, наприклад, принцип максимуму Понтрягіна, класичне варіаційне обчислення, аналітичне конструювання регуляторів та інші методи при визначенні управлінь тяговим рухомим складом не можуть ефективно використовуватися для тягових розрахунків рухомого складу через труднощі завдання критеріїв оцінки одержуваніх рішень, що обираються, перспективними виглядають критерії узагальненої роботи, запропоновані О.О. Красовським. У зв'язку з цим перспективними виглядають такі дослідження:

1. Розвиток математичних моделей для управління дизель-поїздом на ділянках залізниць із довільним профілем колії.

2. Синтез за допомогою геометричної теорії управління еквівалентних математичних моделей для вдосконалення методів розрахунку оптимальних за вартістю енерговитрат при керуванні дизель-поїздом з однією та двома діючими голівками на довільних ділянках залізниць.

3. Визначення найкращого методу теорії оптимального управління лінійними системами для еквівалентних перетворень диференціальної геометрії для розрахунку управлінь об'єктами, які лінеаризовані динамічним зворотним зв'язком.

4. Введення в тягові розрахунки методів теорії оптимального управління лінійними системами.

5. Розробка методу для управління дизель-поїздом в умовах випадкових збурень та еквівалентних перетвореннях моделей динамічним зворотним зв'язком.

6. Аналіз існуючих бортових обчислювальних систем управління тяговим рухомим складом приміського сполучення.

7. Розробка бортової обчислювальної системи на основі геометричної теорії управління у разі проактивних управлінь, мережевих технологій та методів рухомого горизонту.

Список літератури:

1. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А.Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.

2. Zhou R. Doyle J.C., Clover K. Robust and optimal control // Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1995. – 596 p.
3. Басов Г.Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу / Г.Г. Басов, С.І. Ясько. – Харків: Алекс+. 2005. – 41. – 248 с.
4. Габасов Р. Синтез оптимальных замкнутых систем / Р. Габасов, Ф.М. Курилова, И.В. Балашевич // Кибернетика и системный анализ. – 2002. – № 3. – С. 100-119.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и томах. Т. 5: Методы современной теории управления / [под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.
6. Краснощёченко В.И. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза / В.И. Краснощёченко, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с.
7. Краснощёченко В.И. Синтез регуляторов для нелинейных систем, приводимых к канонической форме Бруновского / В.И. Краснощёченко // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1997. – № 569. – С. 28–33.
8. Kim D.P. Automatic Control Theory Nonlinear and Multivariable System. – Seol: Harnal, 2000. – 558 p.
9. Дмитриенко В.Д. Динамическая линеаризация математической модели электрического привода методами геометрической теории управления / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Научные ведомости Бел. ГУ. Сер. Информатика. Прикладная математика. Управление. – Белгород: Бел. ГУ. – 2007. – № 7(38). Вып. 4. – С. 93–107.
10. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: НТМТ, 2013. – 248 с.
11. Заковоротный О.Ю. Синтез автоматичної системи управління рухомих складом на основі геометричної теорії керування та нейронних мереж / О.Ю. Заковоротний. – Автореферат дисертації на здобуття ступеня доктора технічних наук. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – 39 с.
12. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие / Д.П. Ким. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
13. Гребенюк П.Т. Тяговые расчеты. Справочник [под. ред. П.Т. Гребенюк.]. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
14. Новиков А.П. Основы теории вождения поездов / А.П. Новиков. – М.: Транспорт, 1978. – 164 с.
15. Яковлев Д.В. Экономичный режим ведения поезда / Д.В. Яковлев, В.В. Косаров, Л.Г. Мурзин // Электрическая и тепловозная тяга, 1976. – №1. – С. 32-35.

References:

1. Krasovsky, A.A. (1987), Handbook on the theory of automatic control, Moscow, Nauka, 712 p.
2. Zhou, R., Doyle, J.C., Clover, K. (1995), Robust and optimal control // *Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall*, 596 p.
3. Basov, G.G., Yasko, S.I. (2005), Development of an electric motor-carriage warehouse Kharkiv, Alex+, 248 p.
4. Gabasov, R., Kurilova, F.M., Balashevich, I.V. (2002), Synthesis of optimal closed systems, *Cybernetics and system analysis*, Vol. 3, pp. 100-119.
5. Pupkov, K.A., Yegupov, N.D. (2004), Methods of classical and modern theory of automatic control: Textbook in 5 volumes. Vol. 5: Methods of modern control theory, Moscow, Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 784 p.
6. Krasnoshchechenko, V.I., Krishchenko, A.P. (2005), Nonlinear systems: geometric method of

- analysis and synthesis, Moscow, Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman, 520 p.
7. Krasnoshchchenko, V.I. (1997), Synthesis of controllers for nonlinear systems reducible to Brunovsky's canonical form, Proceedings of MSTU im. N.E. Bauman, pp. 28-33.
 8. Kim, D.P. (2000), Automatic Control Theory Nonlinear and Multivariable System, Seoul: Harnal, 558 p.
 9. Dmitrienko, V.D., Zakovorotny, A.Yu. (2007), Dynamic linearization of a mathematical model of an electric drive using methods of geometric control theory, *Scientific sheets Bel. GU. Ser. Computer science. Applied Mathematics. Control*, Belgorod, Bel. GU, No. 7 (38), Issue. 4, pp. 93-107.
 10. Dmitrienko, V.D., Zakovorotny, A.Yu. (2013), Modeling and optimization of diesel train traffic control processes, Kharkov, NTMT, 248 p.
 11. Zakovorotny, O.Yu. (2017), Synthesis of an automatic system for managing a rough warehouse on the basis of the geometric theory of merchandising and neural networks, Abstract of the dissertation on the health degree of Doctor of Technical Sciences, Kharkiv, NTU "KhPI", 39 p.
 12. Kim, D.P. (2004), Theory of automatic control, Vol.2. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems: textbook, Moscow, FIZMATLIT, 464 p.
 13. Grebenyuk, P.T. (1987), Traction calculations. Handbook, Moscow, Transport, 272 p.
 14. Novikov, A.P. (1978), Fundamentals of the theory of driving trains, Moscow, Transport, 164 p.
 15. Yakovlev, D.V., Kosarov, V.V., Murzin, L.G. (1976), Economy mode of train driving, *Electric and diesel traction*, No. 1., pp. 32-35.

Статтю представив д-р. техн. наук, проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" В.І. Носков.

Поступила (received) 06.12.2022

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Zakovorotny Alexandr, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (097) 967-32-71, e-mail: arcade@i.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

Mezentsev Mykola, Cand. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (098) 859-88-98, e-mail: mykola.mezentsev@khpi.edu.ua
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

УДК 517.9, 629.42

Лінеаризація математичної моделі асинхронного тягового привода методами геометричної теорії управління/ Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю., Мезенцев М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2022. – № 1 – 2 (7 – 8). – С. 18 – 29.

Необхідність виробництва більш економічного рухомого складу для залізниць України спричинила створення для перевезення пасажирів сучасного дизель-поїзда з тяговим асинхронним приводом та бортовою вимірально-інформаційною обчислювальною системою, що покращує роботу енергетичного обладнання складу. Зроблено спробу оптимізації законів управління дизель-поїздом за допомогою геометричної теорії управління, яка дозволяє замінити синтез оптимальних законів управління об'єктами, що описуються нелінійними системами звичайних диференціальних рівнянь, лінеаризацією нелінійних систем управління за допомогою зворотного зв'язку та застосуванням добре розробленої теорії управління лінійними системами. Проаналізовано переваги та недоліки зазначеного підходу. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: дизель-поїзд; тяговий асинхронний привід; геометрична теорія управління; лінеаризація нелінійних систем керування за допомогою зворотного зв'язку.

UDK 517.9, 629.42

Linearization of the mathematical model of an asynchronous traction drive using geometric control theory methods/ Dmitrienko V.D., Zakovorotnii O.Yu., Mezentsev M.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2022. – № 1 – 2 (7 – 8). – P. 18 – 29.

The need to produce more economical rolling stock for the railways of Ukraine led to the creation of a modern diesel train with a traction asynchronous drive and an on-board measurement and information computing system for the transportation of passengers, which improves the operation of the energy equipment of the warehouse. An attempt was made to optimize the control laws of a diesel train using a geometric control theory, which allows replacing the synthesis of optimal control laws for objects described by nonlinear systems of ordinary differential equations, linearization of nonlinear control systems using feedback and the application of a well-developed linear control theory systems The advantages and disadvantages of the mentioned approach are analyzed. Bibliography: 15 titles.

Keywords: diesel train; traction asynchronous drive; geometric control theory; linearization of nonlinear control systems using feedback.