

М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев, В. В. Скородєлов

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ СИНТЕЗУ УПРАВЛІНЬ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗМІННОГО СТРУМУ

Розглянуті питання розробки та дослідження моделей для синтезу систем керування електроприводом змінного струму дизель-поїзду. Проведено огляд літературних джерел на задану тематику та аналіз існуючих підходів до розв'язання найпоширеніших задач у даній галузі. Розглянуті системи керування з використанням алгоритмів векторного управління. Побудовані математичні моделі досліджуваних об'єктів, проведено моделювання їхнього функціонування. Отримані аналітичні співвідношення, які можуть бути використані для розробки структури САР електроприводу дизель-поїзда і розрахунку її параметрів при задані певного критерію якості з урахуванням певного його завантаження. Синтезовано закони управління, які забезпечують стійкий розгін дизель-поїзда в різних точках тягової характеристики і при цьому виконуються вимоги щодо точності приведення об'єкта управління в задану точку фазового простору і якості перехідних процесів.

Ключові слова: синтез систем керування, електропривод змінного струму, дизель-поїзд, алгоритми векторного управління, математична модель, закони управління.

Вступ

Завдання розробки моделей для синтезу системи керування тяговим електроприводом змінного струму є складовою частиною загального завдання створення оптимальної системи керування транспортними засобами, що забезпечує виконання графіка руху у відповідності заданому критерію оптимальності. Останніми роками вирішення цих завдань пропонується виконувати з використанням сучасних комп'ютерних технологій, в основу яких покладено методи математичного моделювання та аналізу і синтезу складних технічних систем. Тому розробка оптимальних систем керування та моделей для їх дослідження є актуальною задачею.

Постановка задачі і аналіз відомих публікацій. В даний час значна увага при розробці та вдосконаленні сучасних видів рухомого складу приділяється електропередачам з електроприводом змінного струму та їх системам керування, що забезпечують функціонування як їх самих, так і підсистем окремо, зокрема підсистеми електроприводу змінного струму з частотним способом керування асинхронним двигуном. Ця тенденція має місце не тільки в Україні, але і країнах ближнього і далекого зарубіжжя [1]. На сьогодні поряд з частотним способом керування все більшої уваги приділяється розробкам систем керування на основі алгоритмів векторного управління [2 – 10]. Ці алгоритми активно впроваджуються у високоякісних електроприводах трифазного струму. В алгоритмах керування закладена ідея орієнтування потоку асинхронного двигуна. З точки зору математичної моделі ідея полягає в приведенні системи рівнянь трифазного асинхронного двигуна [2, 4, 10] до ортогональної системи координат d-q, що обертається із швидкістю вектора потоку ротора, в якій змінні представляються, як сталі величини постійного струму. З точки зору системи керування – фазу і амплітуду струму статора необхідно регулювати так, щоб складова струму по одній осі, що визначає потік, залишалася постійною. Регулювання моменту здійснюється тільки зміною складової струму по другій осі.

Вхідними параметрами для системи є частота обертання ротора тягового двигуна і момент завдання для забезпечення виконання заданого графіка руху відповідно до необхідного критерію оптимальності. Напруги статора (керуючі впливи) системи рівнянь (математичної моделі) трифазного асинхронного двигуна як в рухомій, так і нерухомій системі координат визначаються по рівняннях векторного управління.

Рішення задачі розроблення оптимальної системи керування електроприводом змінного струму в першу чергу пов'язане зі створенням нелінійних математичних моделей з врахуванням особливостей використання того чи іншого методу синтезу управління, критеріїв оцінки якості функціонування системи керування, проведенням комплексних досліджень динаміки електромеханічної системи електроприводу. Для рішення завдань оптимального керування присвячено значне число публікацій [6], де для синтезу використовується математичне моделювання, сучасні методи теорії автоматичного керування та оптимізації, комп'ютерні технології. В [6] пропонується ряд методів синтезу управління та математичні моделі електроприводу змінного струму, які можуть бути використані при розробці систем управління з урахуванням вибраного критерію оптимальності. Як правило, задовільний результат отримується при синтезі оптимальних систем керування для об'єктів, які описуються системою диференціальних рівнянь не вище третього порядку. Для систем вищих порядків можливо використовувати комбінований метод знаходження управління. Він зводиться до наступного. На першому етапі з використанням спрощеної моделі електроприводу знаходиться загальний вид управління. На другому – задаються закони можливих управління та в процесі дослідження уточнюються їх види та параметри системи керування за допомогою повної математичної моделі.

Метою даної роботи є розроблення математичних моделей для синтезу системи керування електроприводом змінного струму з використанням алгоритму векторного управління, проведення досліджень моделей синтезованих управління, отримання якісних

характеристик роботи систем керування в процесі моделювання з використанням пакету MATLAB.

Основна частина

Вихідними змінними для даного об'єкту управління (дизель-поїзда з електроприводом змінного струму) є швидкість руху V і пройдений шлях S . За відсутності боксування швидкість руху пропорційна кутовій електричній швидкості обертання ротора двигуна ω . Рівняння руху має вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1(M_t - M_c), \quad (1)$$

де M_t – тяговий момент дизель-поїзда; $K_1 = p/J_t$; J_t – момент інерції дизель-поїзда; M_c – момент опору руху, який згідно правил тягових розрахунків, знаходиться згідно виразу:

При номінальному завантаженні $M_c = M_{cn}$:

$$M_c = 1299(1.1 + 0.012 * 0.1545 \omega) \text{ (Нм)},$$

або $M_c = 1429 + 2.41 \omega \text{ (Нм)}. \quad (2)$

За умови, що тяговий момент дизель-поїзду здійснюють чотири двигуни, то рівняння руху матиме вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1(4M_d * i - M_c),$$

де M_d – електромагнітний момент двигуна; i – передавальне число редуктора ($i = 3.69$).

З урахуванням рівняння (2), отримаємо:

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1(K_2 M_d - 1429 - 2.41\omega) = K_1(K_2 M_d - K_3 - K_4\omega), \quad (3)$$

де $K_2 = 14.76$; $K_3 = 1429$; $K_4 = 2.41$.

або $\frac{d\omega}{dt} = K_5 M_d - K_6\omega - K_7, \quad (4)$

де $K_5 = K_1 K_2 = 0.000915$; $K_6 = K_1 K_4 = 0.00015$; $K_7 = K_1 K_3 = 0.089$.

Можемо записати:

$$\frac{dx_1}{dt} = K_5 M_d - K_6 x_1 - K_7. \quad (5)$$

В результаті отримали диференціальне рівняння першого порядку, яке описує динаміку руху дизель-поїзда при номінальному завантаженні. В якості управління виступає електромагнітний момент тягового двигуна M_d . Для його визначення використаємо модель тягового двигуна у вигляді системи диференціальних рівнянь, де для формування напруги живлення та її частоти використовується алгоритм векторного управління.

Згідно [4, 10], за умови, якщо швидкість обертання координат ω_k співпадає із швидкістю вектора потоку ротора $\omega\Psi$ ($\omega_k = \omega\Psi$), то вектор потокозчеплення ротора Ψ_r відображається на вісь 1 своїм модулем Ψ_{rm} , а його проекція на вісь 2 дорівнює нулю і

рівняння, що описують динаміку електромагнітних процесів тягового двигуна, матимуть вигляд [2]:

$$U_{s1} = \frac{d\Psi_{s1}}{dt} - \Psi_{s2}\omega\Psi + R_s I_{s1}; \quad (6)$$

$$U_{s2} = \frac{d\Psi_{s2}}{dt} + \Psi_{s1}\omega\Psi + R_s I_{s2}; \quad (7)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{rm}}{dt} + R_r I_{r1}; \quad (8)$$

$$0 = (\omega\Psi - p\omega)\Psi_{rm} + R_r I_{r2}; \quad (9)$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2}, \quad (10)$$

де Ψ_{rm} – модуль вектора потоку ротора; I_{s1} , I_{s2} , I_{r1} , I_{r2} – відповідно проекції на вісі координат струмів статора і ротора; R_s , R_r – відповідно активні опори обмоток статора і ротора ТАД; m – число фаз; p – число пар полюсів; K_r – коефіцієнт зв'язку ротора; ω – швидкість обертання ротора; ω_s – швидкість вектора напруги статора; $\omega\Psi$ – швидкістю вектора потоку ротора.

Використовуючи рівняння зв'язку [2]

$$\Psi_r = I_r L_r + I_s L_m; \quad \Psi_s = I_s L_s + I_r L_m,$$

отримаємо:

$$U_{s1} = \frac{dI_{s1}}{dt} L_s' + K_r \frac{d\Psi_{r1}}{dt} - I_{s2} L_s' \omega\Psi + R_s I_{s1}; \quad (11)$$

$$U_{s2} = \frac{dI_{s2}}{dt} L_s' + I_{s1} L_s' \omega\Psi + K_r \Psi_{rm} + R_s I_{s2}; \quad (12)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{rm}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} K_r R_r; \quad (13)$$

$$0 = \beta \Psi_{rm} - I_{s2} K_r R_r; \quad (14)$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2}, \quad (15)$$

де $L_s' = L_s - L_m^2/L_r$, $K_r = L_m/L_r$.

Використовуючи рівняння (11) і (12) і рівняння зв'язку для системи управління з регулюванням напруги живлення, знаходимо співвідношення, за допомогою яких визначаються проекції напруги живлення ТАД по кожній із осей при відомій її частоті.

$$U_{s1} = R_s I_{s1} - I_{s2} L_s' \omega\Psi; \quad (16)$$

$$U_{s2} = R_s I_{s2} + \omega\Psi \Psi_{rm} \left(\frac{L_s'}{L_m} + K_r \right). \quad (17)$$

Момент тягового двигуна M_d знаходиться згідно рівняння (15) по відповідним значенням потокозчеплення Ψ_{rm} і струму I_{s2} . Для визначення потокозчеплення Ψ_{rm} використаємо диференціальне рівняння (13). Тяговий момент, який як управління в рівнянні (5), визначається фазовою змінною Ψ_{rm} і проекцією вектора струму статора - струмом I_{s2} .

Змінна Ψ_{rm} , згідно диференційного рівняння (13), визначається струмом I_{s1} . В результаті, в якості управлінь, можемо вибрати проекції вектора струму статора - струми I_{s1} і I_{s2} .

З урахуванням динамічних процесів для визначення проекції потоку ротора Ψ_{rm} використаємо рівняння (13) у вигляді:

$$\frac{d\Psi_{rm}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}\Psi_{rm} + I_{s1}\frac{L_m R_r}{L_r}. \quad (18)$$

При заданих параметрах ТАД отримаємо:

$$\frac{d\Psi_{rm}}{dt} = -0.771\Psi_{rm} + 0.0668I_{s1}. \quad (19)$$

Аналогічно із рівнянням (5) рівняння (19) для оптимізаційної моделі запишемо у вигляді:

$$\frac{dx_2}{dt} = -0.771x_2 + 0.0668I_{s1}. \quad (20)$$

Для синтезу управлінь об'єкт дослідження представляється моделлю у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\dot{X}_1 + a_{11}X_1 - a_{12}X_2U_1 + 0.089 = 0, \quad (21)$$

$$\dot{X}_2 + a_{21}X_2 - a_{22}U_2 = 0. \quad (22)$$

де $X_1, X_2, \dot{X}_1, \dot{X}_2$ – відповідно фазові змінні та їх похідні; U_1, U_2 – управління; $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ – коефіцієнти, які визначаються параметрами системи.

Для системи, що досліджується:

$$X_1 = \omega; X_2 = \Psi_{rm};$$

$$a_{11} = 0.00015; a_{12} = 0.004; a_{21} = 0.771;$$

$$a_{22} = 0.068; U_1 = I_{s2}; U_2 = I_{s1}.$$

Оскільки математична модель об'єкта з використанням алгоритму векторного управління за певних обмежень може бути представлена системою диференціальних рівнянь другого порядку (21) – (22), то для синтезу управлінь пропонується використати один з методів варіаційного числення – рішення загальної задачі Лагранжа.

При рішенні задачі оптимізації, використовуючи метод варіаційного числення, як рішення загальної задачі Лагранжа, математична модель об'єкта задається у вигляді системи диференціальних рівнянь у вигляді:

$$\dot{X}_j - \psi_j(X_1, X_2, \dots, X_n, U_j) = 0, \quad (23)$$

де X_j – змінні співвідношення; U_j – управління, $i = \overline{1, n}$.

Відомі початкові і кінцеві стани об'єкту: $X_i(0), X_i(T)$.

Заданий критерій оптимальності:

$$J = \int_{t_0}^T G(X_1, X_2, \dots, X_n, U_j) dt. \quad (24)$$

Відомі області допустимих управлінь.

Рівняння об'єкту розглядаються як рівняння зв'язків в загальній задачі Лагранжа варіаційного числення. Критерієм оптимальності є функціонал, що мінімізується.

Якщо на управління і стани ніяких обмежень не накладено, то рішення задачі оптимізації шукається по аналогії з методами варіаційного числення. З цією метою складається допоміжний функціонал:

$$J_1 = \int_{t_0}^T [G + \sum_{j=1}^n \lambda_j(t)(\dot{X}_j - \psi_j)] dt = \int_{t_0}^T G_1 dt. \quad (25)$$

Відносно функцій U_j, X_j, λ_j , складаються рівняння Ейлера:

$$\frac{dG_1}{dU_i} - \frac{d}{dt} \frac{dG_1}{d\dot{U}_i} = 0. \quad (26)$$

Тут в рівнянні (26) під U_i розуміються функції U_j, X_j, λ_j .

В результаті отримаємо систему рівнянь по числу невідомих $U_j(t), X_j(t), \lambda_j(t), j = \overline{1, n}$.

Розглянемо розробку моделі оптимізації відносно енергетичних витрат при розгоні дизель-поїзда за заданий час і виконання граничних умов по швидкості і пройденому шляху.

Функціонал, що мінімізує енергетичні витрати, можливо задати у вигляді:

$$J = \int_{t_0}^T (U_1^2 + U_2^2) dt, \quad (27)$$

де U_1, U_2 – управління, t_0, T – початковий і кінцевий терміни часу розгону.

Тоді нова підінтегральна функція G_1 описується співвідношенням:

$$G_1 = U_1^2 + U_2^2 + \lambda_1(\dot{X}_1 + a_{11}X_1 - a_{12}X_2U_1 + 0.089) + \lambda_2(\dot{X}_2 + a_{21}X_2 - a_{22}U_2). \quad (28)$$

На підставі рівняння Ейлера (26) складемо співвідношення для знаходження рівнянь U_1, U_2 .

Для U_1 :

$$\frac{dG_1}{dU_1} = 2U_1 - a_{12}\lambda_1X_2 = 0. \quad (29)$$

Для U_2 :

$$\frac{dG_1}{dU_2} = 2U_2 - a_{22}\lambda_2 = 0. \quad (30)$$

Тоді управління U_1, U_2 знаходяться як:

$$U_1 = a_{12}\lambda_1X_2 / 2; \quad (31)$$

$$U_2 = a_{22}\lambda_2 / 2. \quad (32)$$

Невідомими є λ_1 та λ_2 . Для визначення λ_1 та λ_2, X_1 та X_2 складемо рівняння Ейлера згідно (26).

$$\frac{dG}{d\lambda_1} = \dot{X}_1 + a_{11}X_1 - a_{12}X_2U_1 + 0.089 = 0; \quad (33)$$

$$\frac{dG}{d\lambda_2} = \dot{X}_2 + a_{21}X_2 - a_{22}U_2 = 0. \quad (34)$$

В результаті отримали аналогічні співвідношення, що відповідають початковим рівнянням (21), (22) для знаходження невідомих X_1 і X_2 та описують динаміку об'єкта управління, що досліджується.

Аналогічно знаходяться рівняння для визначення невідомих λ_1 та λ_2 .

Для визначення невідомих λ_1 та λ_2 отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\dot{\lambda}_1 - a_{11}\lambda_1 = 0; \quad (35)$$

$$\dot{\lambda}_2 + \lambda_1 a_{12}U_1 - a_{21}\lambda_2 = 0. \quad (36)$$

В результаті отримали систему диференціально-алгебраїчних рівнянь для знаходження управлінь U_1 і U_2 .

Оскільки з однієї сторони система рівнянь нелінійна, а з другої знаходження невизначених множників Лагранжа λ_1 і λ_2 потребує для їх знаходження багатократного перебору варіантів, то рішення задачі знаходження управлінь, які б задовольняли критерію оптимізації згідно з виразом (27), можливо шляхом моделювання.

Для практичного визначення закону зміни невідомих λ_1 та λ_2 і знаходження управлінь U_1 і U_2 пропонується наступний підхід. Згідно рівняння (30) управління $U_1 = a_{12}\lambda_1 X_2 / 2$, U_1 – це струм I_{s2} , який визначає тяговий момент. Тоді із математичної моделі (10) виходить:

$$I_{s2} = 2M_d / (mpK_r) \Psi_{rm}. \quad (37)$$

При максимально-допустимому моменті (паспортні дані) ($M_d = 4800$ Нм) і умові, що $\Psi_{rm} = 1$ В та параметрах ($m=3$, $p=3$, $K_r=0.982$), згідно (37) буде досягатися максимально-допустиме значення струму I_{s2} ($I_{s2} = 960$ А).

Використовуючи рівняння (30) можемо знайти межі зміни змінної λ_1 .

$$\lambda_{1\max} = 2I_{s2} / a_{12} = 480000.$$

При $\Psi_{rm} = \text{const}$ (за рахунок стабілізації струму), згідно досліджень, форма зміни моменту M_d має експоненціальний характер (див. рис. 2), то закон зміни λ_1 можемо представити у вигляді:

$$\lambda_1 = B (1 - e^{-kt}), \quad (38)$$

де $B = 480000$ (визначається паспортними даними двигуна), $k = 0.2$ (значення k в процесі досліджень може уточнитись).

Для певної завантаженості управління U_1 буде визначатись згідно виразу:

$$U_1 = a_{12}B (1 - e^{-kt}) X_2 / 2. \quad (39)$$

Згідно (32) управління $U_2 = a_{22}\lambda_2 / 2$. U_2 – це струм I_{s1} , який визначає поточозчеплення.

Визначимо λ_2 аналогічно як і λ_1 . Із процесів моделювання слідує, що характер зміни U_2 (це практично Ψ_{rm}) теж носить експоненціальний характер. Реально максимальне значення Ψ_{rm} не більше 6 (В).

Із рівняння (13) за умови закінчення перехідного процесу можемо записати співвідношення для визначення струму I_{s1} .

$$I_{s1} = \Psi_{rm} / L_m. \quad (40)$$

Тоді $I_{s1\max} = 60$ (А).

Із рівняння (32) знайдемо λ_2 :

$$\lambda_2 = 2 U_2 / a_{22}. \quad (41)$$

В загальному вигляді:

$$\lambda_2 = (2\Psi_{rm} / L_m a_{22})(1 - e^{-kt}), \quad (42)$$

де k – темп наростання сигналу Ψ_{rm} (початкове значення коефіцієнта $k = 0.2$).

Управління U_2 буде визначатись наступним співвідношенням:

$$U_2 = (\Psi_{rm} / L_m)(1 - e^{-kt}). \quad (43)$$

Для певної завантаженості управління визначаються згідно виразу:

$$U_1 = a_{12}B (1 - e^{-kt}) X_2 / 2; \quad (44)$$

$$U_2 = (X_2 / L_m)(1 - e^{-kt}), \quad (45)$$

де $B = 480000$, $k = 0.2$ (значення k в процесі досліджень може уточнитись), L_m – індуктивність контура намагнічування ($L_m = 0.0917$ Гн).

Перевірка законів управління досліджувалась наступним чином.

Відповідно до синтезованих законів управління (44) – (45) системою керування формувалися згідно системи диференціальних рівнянь (21) і (22) частота обертання ротора ТАД, поточозчеплення Ψ_{rm} та момент ТАД M_d . На їх основі визначалися проєкції вектора напруги живлення ТАД U_{s1} і U_{s2} та його частота ω_s , які є вхідними впливами для моделі об'єкта дослідження. Об'єкт дослідження – це електромеханічна частина електроприводу дизель-поїзда з тяговими двигунами змінного струму, математична модель якого представлялась у вигляді системи диференціальних рівнянь п'ятого порядку в рухомій системі координат d-q [3, 6].

Момент опору руху M_c , згідно правил тягових розрахунків, задавався згідно рівняння (2).

На рис. 1 і 2 наведено результати моделювання розробленої системи у вигляді перехідних процесів поточозчеплень Ψ_{rm} та електромагнітного моменту ТАД M_d , що демонструють роботу моделі при певному значенні управлінь U_1 і U_2 в системі керування і як реакції на управління об'єкта дослідження.

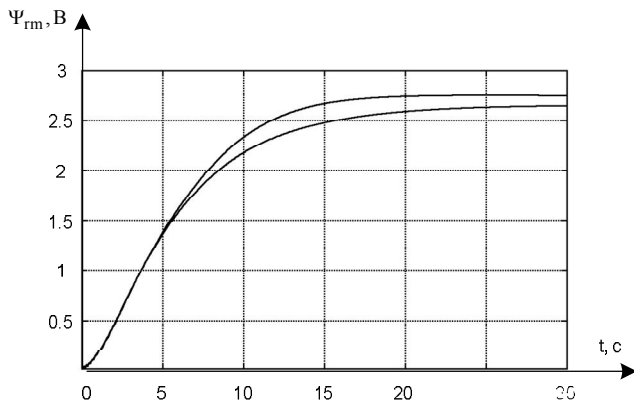


Рис. 1. Процеси зміни законів управління за потокозчепленням

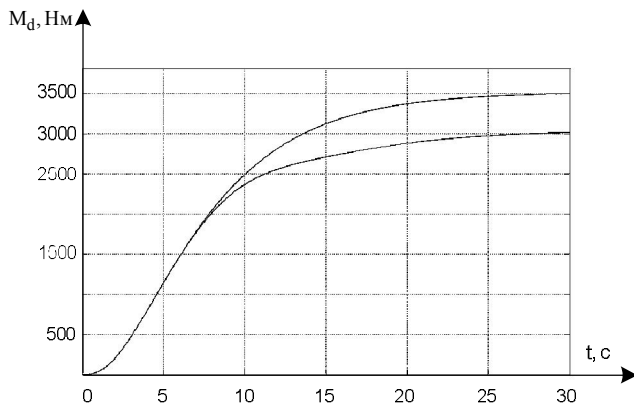


Рис. 2. Процеси зміни законів управління за моментом ТАД

На рис. 3 приведені перехідні процеси у вигляді осцилограм як різниці сигналів завдання частоти обертання ротора і реакції електроприводу (вихідного сигналу моделі електромеханічної системи частоти обертання ротора), що демонструють роботу моделі при певному значенні управлінь U_1 і U_2 .

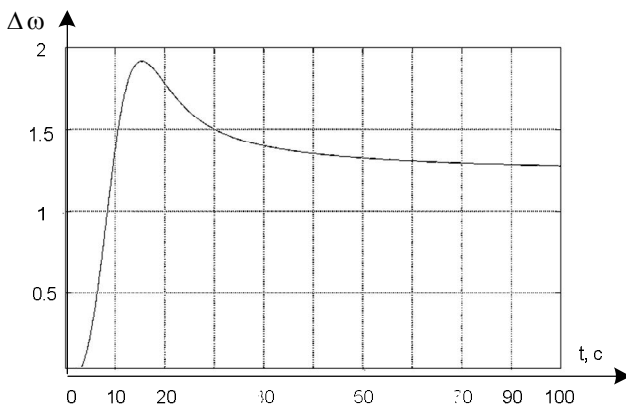


Рис. 3. Процеси зміни різниці швидкостей завдання та обертання ТАД

Відповідно до цих процесів керування по потокозчепленню отримані показники витрат енергії при розгоні дизель-поїзду з різними показниками навантаженості, швидкості руху та пройденого шляху за певний проміжок часу. Як критерій оптимальності

використовувався критерій мінімуму енергетичних витрат при виконанні обмежень по величині пройденого шляху і швидкості в кінцевий момент часу. Розглядалися різні режими роботи електроприводу, зокрема, розгін дизель-поїздя за заданий час t і оцінювалися отримані характеристики (швидкість, пройдений шлях і енергетичні витрати). Результати дослідження приведені в табл. 1.

Як слідує із таблиці за умови досягнення швидкості $V = 58.49$ км/год і пройденого шляху $S = 749.7$ м значення управлінь

$$U_1 = 250 \text{ А}, U_2 = 48.06 \text{ А}$$

має перевагу до управління $U_1 = 300 \text{ А}, U_2 = 40 \text{ А}$.

При цьому економія енергії становить 1.67%.

Таблиця 1 – Результати аналізу функціонування моделі ($p/J = 0/000071$; $t = 100$ с)

U_1 , А	U_2 , А	V , км/год	S , м	$P \cdot 10^4$, кВт*с	P/S
300	30	43.66	561.3	1.042	18.56
250	30	36.15	464.4	0.715	15.4
200	30	28.64	367.6	0.453	12.32
150	30	21.4	270.9	0.253	9.34
300	25	36.28	467.6	0.756	16.17
250	25	29.99	386.2	0.517	13.40
200	25	23.71	304.9	0.323	10.59
150	25	17.44	223.8	0.180	8.04
300	35	51.07	655.7	1.38	21.05
300	40	58.49	750.4	1.773	23.63
300	45	65.91	846.2	2.22	26.23
250	35	42.32	543.1	0.951	17.51
250	40	48.51	622	1.225	19.69
250	45	54.7	701.1	1.538	21.94
250	50	60.89	780.3	1.892	24.25
250	48	58.41	748.6	1.746	23.32
250	48.05	58.47	749.4	1.749	23.34
250	48.06	58.49	749.7	1.75	23.34

Виходячи з проведених результатів дослідження можна зробити висновок, що розроблена модель на основі використання алгоритму векторного керування електроприводом та отримані закони управління, дозволяють оптимізувати роботу енергетичної системи дизель-поїзда в процесі розгону з урахуванням його навантаженості, забезпечуючи при цьому виконання заданих граничних умов, а також проводити дослідження систем керування в замкнутій системі управління.

Висновки

1. Розроблена математична модель електроприводу дизель-поїзда може бути використана для дослідження і уточнення параметрів системи управління з метою оптимізації енергетичних показників.

2. Отримані аналітичні співвідношення можуть бути використані для розробки структури САР електроприводу дизель-поїзда і розрахунку її параметрів при заданні певного критерію якості з урахуванням певної навантаженості.

3. Запропонована оптимізаційна математична модель, закони управління, аналітичні співвідношення для визначення параметрів САР реалізовані у вигляді машинної моделі. Проведені дослідження показали перспективність такого підходу при розробці сучасних оптимальних систем управління електроприводом дизель-поїздів з тяговими двигунами змінного струму.

4. На підставі проведених досліджень і порівнянні результатів отриманих на моделі в динамічних режимах і за різних умов розгону дизель-поїзда (величини вантаженості, значення управлінь) встанов-

лено, що процес розгону при запропонованих законах управління стійкий. При цьому виконуються вимоги щодо точності приведення об'єкта управління в задану точку фазового простору і якості управління.

5. Розроблена оптимізаційна модель на основі алгоритму векторного керування ТАД та запропоновані закони управління дозволяють оптимізувати роботу енергетичної системи дизель-поїзду в процесі розгону, забезпечуючи при цьому виконання заданих граничних умов, а також проводити дослідження систем керування в замкнутій системі управління.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Horstmann D. 100 Jahre Entwicklung der Antriebsstechnik für elektrische Bahnen. Teil 2 / Daniel Horstmann, Rudolf Wagner, Wolf-Dieter Weigel // Elek. Bahnen. – 2003. – No 7. – P. 338-345.
1. 2. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями : Учебное пособие / А.А. Усольцев СПб: СПбГУ ИТМО, 2002. – 43 с.
2. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
3. Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
4. Bose Bimal K. Modern Power Electronics and AC drives / Bimal K. Bose. – Pr. Hall PTR: Prentice-Hall Inc. – 2002. – 712 p.
5. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю.]. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
6. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung. Die Grundlage für die Transvektor-Reglung von Drehfeldmaschine / F. Blaschke // Siemens Zeitschrift. – 1971. – № 45. – Н. 10.
7. Volkov A.V. Asynchronous motor drive based on self-excited current inverter with switched-off thyristors and provided with redicting relay and vector regulation of stator current / A.V. Volkov, I.A. Kosenko // Elektrotehnika. – 2008. – No 10. – P. 6-17.
8. Пересада С.М. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, В.С. Бовкунович // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 1. – С. 60-66.
9. Заполовський М.Й. Синтез управлінь для оптимізації динамічних процесів електроприводу змінного струму / М.Й. Заполовський, В.В. Скороделов, М.В. Мезенцев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Вип. 4(50). Полтава. 2018. С. 38-41.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г. А. Кучук,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 10.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.09.2019

Математическая модель для синтеза управлений электроприводом переменного тока

Н. И. Заполовский, Н. В. Мезенцев, В. В. Скороделов

Рассмотрены вопросы разработки и исследования моделей для синтеза систем управления электроприводом переменного тока дизель-поезда. Проведен обзор литературных источников по заданной тематике и анализ существующих подходов к решению наиболее распространенных задач в данной области. Рассмотрены современные варианты с использованием алгоритмов векторного управления. Построены математические модели, проведено моделирование их функционирования. Полученные аналитические соотношения, которые могут быть использованы для разработки структуры САР электропривода дизель-поезда и расчета ее параметров при задании определенного критерия с учетом определенной загруженности состава. Синтезированы законы управления, обеспечивающие устойчивый разгон дизель-поезда в различных точках тяговой характеристики и при этом выполняются требования по точности приведения объекта управления в заданную точку фазового пространства и качества переходных процессов.

Ключевые слова: синтез систем управления, электропривод переменного тока, алгоритмы векторного управления, математическая модель, законы управления.

Mathematical model for the synthesis of controls for AC electric drive

M. Zapolovsky, M. Mezentsev, V. Skorodelov

The issues of development and research of models for the synthesis of control systems for AC electric drive of an alternating current of a diesel train are considered. A review of literary sources on a given topic and an analysis of existing approaches to solving the most common problems in this area are carried out. Modern options using vector control algorithms are considered. Mathematical models are constructed, modeling of their functioning is carried out. The obtained analytical relations that can be used to develop the structure of the automatic control system of the electric drive of the diesel train and calculate its parameters when specifying a certain criterion taking into account a certain workload of the train. Control laws have been synthesized that provide stable acceleration of a diesel train at various points of the traction characteristic, while the requirements for the accuracy of bringing the control object to a given point in the phase space and the quality of transient processes are fulfilled.

Keywords: synthesis of control systems, AC electric drive, vector control algorithms, mathematical model, controls.