

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

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

СИНТЕЗ УПРАВЛІНЬ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ 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 як стандартні системи керування так і сучасні варіанти з використанням алгоритмів векторного управління. Побудовані математичні моделі та структурні схеми 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. Синтезовано закони управління, які забезпечують стійкий розгін дизель-поїзда як в статичних так і в динамічних режимах 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, алгоритми векторного управління, математична модель.

Вступ

Завдання синтезу системи управління тяговим електроприводом змінного струму є складовою частиною загального завдання створення оптимальної системи управління транспортними засобами, що забезпечує виконання графіка руху у відповідності заданому критерію оптимальності, зокрема, мінімуму енергетичних витрат. Останніми роками вирішення цих завдань пропонується виконувати з використанням сучасних технологій, в основі яких лежать методи аналізу і синтезу складних технічних систем та математичне моделювання. Тому розробка ефективних систем управління та моделей для їх дослідження є актуальною задачею.

Постановка задачі і аналіз відомих публікацій. В даний час значна увага при розробці сучасних видів рухомого складу приділяється питанням вдосконалення і створення систем управління, що забезпечують функціонування як його самого, так і підсистем окремо, зокрема електроприводу змінного струму з частотним способом управління асинхронним двигуном. Ця тенденція має місце не тільки в Україні, але і країнах ближнього і далекого зарубіжжя [1].

Поряд з частотним способом управління асинхронним двигуном електроприводу особлива увага приділяється розробці систем управління на основі алгоритмів векторного управління, який сьогодні розглядається не тільки з точки зору економії споживаної енергії, але і з точки зору вдосконалення процесами управління [2 – 10]. Ці алгоритми активно упроваджуються у високоякісних приводах трифазного струму, зокрема алгоритми, в яких використовується ідея орієнтування потоку асинхронної машини. Поліпшення регульовальних властивостей асинхронної машини виконується за рахунок реалізації моделі еквівалентної їй машини постійного струму, у якій є два канали управління - моментний і струмовий. Ідея орієнтування потоку полягає в приведенні системи рівнянь трифазного асинхронного двигуна до ортогональної системи координат $d-q$, що обертається із швидкістю вектора потоку

ротора, в якій змінні представляються, як сталі величини постійного струму. Фазу і амплітуду струму статора регулюють так, щоб складова струму по одній осі, що визначає потік, залишалася постійною, а регулювання моменту здійснювалося тільки змінною складовою струму по другій осі, що створює момент двигуна. Вхідними параметрами для системи є частота обертання ротора двигуна і момент завдання (тяга), решта параметрів машини, такі як струми і напруга статора, потокозчеплення ротора, відновлюються по рівняннях векторного управління.

Огляд робіт, присвячених задачі розробки ефективних систем управління електроприводом змінного струму показує, що недостатня увага приділяється створенню оптимальних систем управління на основі сучасних досягнень проектування з використанням методів оптимізації, нечіткої логіки, нейрокомп'ютерних технологій, орієнтованих на побудову не аналогових, а цифрових систем. Рішення задачі розробки оптимальної системи управління досліджуваного об'єкта (дизель-поїзда) пов'язане зі створенням нелінійних математичних моделей, вибору методу та синтезу управлінь, критеріїв оцінки якості функціонування системи, проведенням комплексних досліджень динаміки електромеханічної системи. Для рішення завдань оптимального управління присвячено значне число публікацій [5] та зазвичай використовується математичне моделювання, сучасні методи теорії автоматичного керування та оптимізації, прогресивні інформаційні технології, технічні засоби реалізації на базі мікропроцесорної техніки компонент систем автоматичного регулювання.

В [5] пропонується ряд методів синтезу управлінь та математичні моделі електроприводу змінного струму, які можуть бути використані при розробці систем управління з урахуванням вибраного критерію оптимальності. Оскільки складова об'єкта управління (електропривод) описується системою нелінійних диференціальних рівнянь не менш 5-го порядку, то аналітичний синтез управлінь практично неможливий. Тому в роботі розглядається комбінований метод знаходження управлінь. Він зводить-

ся до наступного. На першому етапі з використанням спрощеної моделі електроприводу знаходиться загальний вид управління. На другому - задаються закони можливих управлінь та в процесі дослідження уточнюються їх види та параметри системи керування за допомогою повної математичної моделі.

Метою даної роботи є розробка математичних моделей, синтез системи управління електроприводу дизель-поїзду, проведення досліджень системи управління за допомогою моделювання, отримання якісних характеристик роботи систем управління в процесі моделювання з використанням пакету MATLAB.

Основна частина

Оскільки спрощена математична модель об'єкта з використанням алгоритму векторного управління за певних обмежень може бути представлена системою диференційних рівнянь другого порядку [6], то для синтезу управлінь було використано метод варіаційного числення – рішення загальної задачі Лагранжа. 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 швидкості обертання ротора ω . Тоді рівняння руху має вигляд:

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

де M_t – тяговий момент дизель-поїзда; $K_1 = 1/j_t$; j_t – момент інерції дизель-поїзда; M_c – момент опору руху. За умови, що тяговий момент дизель-поїзда здійснюють чотири двигуни, то рівняння руху матиме вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1(4M_d - k_2\omega), \quad (2)$$

де M_d – електромагнітний момент двигуна; k_2 – постійний коефіцієнт.

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

$$\dot{X}_1 + a_{11}X_1 - a_{12}U_1 = 0; \quad (3)$$

$$\dot{X}_2 + a_{21}X_2 - a_{22}X_1U_2 = 0, \quad (4)$$

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.

Функціонал, що мінімізує енергетичні витрати,

$$J = \int_{t_0}^T (U_1^2 + U_2^2) X_2 dt. \quad (5)$$

В результаті синтезу, шляхом рішення загальної задачі Лагранжа, отримані управління:

$$U_1 = K_1 c_1 e^{k_2 t} \cdot (1/X_2); \quad (6)$$

$$U_2 = K_3 c_2 e^{k_4 t} \cdot (X_1/X_2). \quad (7)$$

При цьому коефіцієнти моделі, які визначались параметрами системи, становлять величини: $K_1 = 0.015$; $K_2 = 2.23$; $K_3 = 0.000008$; $K_4 = 0.003$. Коефіцієнти c_1, c_2 – визначались експериментально в процесі моделювання. З рівнянь (6), (7) витікає, що закон зміни U_1 зворотно пропорційний швидкості обертання ротора асинхронного двигуна, а U_2 (фізично це електромагнітний момент) прямо пропорційний X_1 і зворотно пропорційний швидкості руху ω .

Синтезовані закони (6), (7) можуть бути використані при побудові системи керування електроприводом змінного струму дизель-поїзду при реалізації алгоритмів векторного управління на основі математичної (повної) моделі, яка описує динамічні процеси електроприводу змінного струму в рухомій системі координат [2 – 4].

Вхідними параметрами для системи керування є частота обертання ротора двигуна і момент задання (тяга), решта параметрів, такі як струми і напруга статора, потокозчеплення ротора, відновлюються по рівняннях векторного управління.

Якщо швидкість обертання координат співпадає із швидкістю вектора потоку ротора і за умови $\omega_s = \omega_\psi$, рівняння для статора і ротора АД в рухомій системі координат, мають вигляд:

$$\frac{d\Psi_{s1}}{dt} = \Psi_{s2}\omega_\psi - R_S I_{s1} - U_{s1}; \quad (8)$$

$$\frac{d\Psi_{s2}}{dt} = -\Psi_{s1}\omega_\psi - R_S I_{s2} - U_{s2}; \quad (9)$$

$$\frac{d\Psi_{rm}}{dt} = -R_R I_{r1}; \quad (10)$$

$$(\omega_\psi - p\omega)\Psi_{rm} + R_R I_{r2} = 0; \quad (11)$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2}, \quad (12)$$

де $\Psi_{s1}, \Psi_{s2}, U_{s1}, U_{s2}$ – відповідно проекції на осі координат потокозчеплень статора і ротора та напруги живлення; Ψ_{rm} – модуль вектора потоку ротора; $I_{s1}, I_{s2}, I_{r1}, I_{r2}$ – відповідно проекції на осі координат токів статора і ротора; R_S, R_R – відповідно активні опори обмоток статора і ротора АД; m – число фаз; p – число пар полюсів; K_r – коефіцієнт зв'язку ротора; ω – швидкість обертання ротора; ω_s – швидкість вектора напруги статора; ω_ψ – швидкістю вектора потоку ротора.

Використовуючи рівняння зв'язку та, що система рівнянь повинна стабілізувати потік ротора Ψ_{rm} , отже і струм I_{s1} , рівняння кіл статора і ротора АД приймуть вигляд [2]:

$$U_{s1} = R_S I_{s1} - I_{s2} L_S' \omega_\psi; \quad (13)$$

$$\frac{dI_{s2}}{dt} L_S' = -R_S I_{s2} - I_{s1} L_S' \omega_\psi - K_r \Psi_{rm} \omega_\psi + U_{s2}; \quad (14)$$

$$\frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r} = 0; \quad (15)$$

$$\beta \Psi_{rm} - \frac{R_r L_m}{L_r} I_{s2} = 0, \quad (16)$$

де $L_s' = L_s / L_r$, L_m , L_s , L_r – відповідно індуктивності намагнічування, статора і ротора.

Закони формування струмів:

$$I_{s1} = \frac{1}{L_m} \Psi_{rm}; \quad I_{s2} = \frac{M_d}{\Psi_{rm}} \frac{2}{mpK_r} \quad (17)$$

Визначення величини абсолютного ковзання:

$$\beta = \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{I_{s2}}{\Psi_{rm}}. \quad (18)$$

Визначення необхідної швидкості вектора напруги статора:

$$\omega_\Psi = p \omega + \beta. \quad (19)$$

На основі рівнянь (13) – (19) розроблена структурна схема моделі в пакеті MATLAB, за допомогою якої проведені дослідження синтезованих управлінь. Якщо прийняти до уваги, що згідно (3)

$$U_1 = I_{s1} = \frac{\Psi_{rm}}{L_m},$$

то для вибору ефективних управлінь по потокозчепленню та електромагнітному моменту було запропоновано по чотири функції з кожного із управлінь ($\Psi_1 - \Psi_4$) та ($M_1 - M_4$), вид яких відповідає характеру поведінки згідно рівнянь (6), (7):

$$\Psi_1 = C_1 / (C_2 + K_1 \omega);$$

$$\Psi_2 = C_1 / (C_2 + K_1 \omega \cdot \omega);$$

$$\Psi_3 = C_1 / (C_2 + K_1 \omega) \cdot C_3 e^{-K_2 t};$$

$$\Psi_4 = C_1 / (14 / C_2 + K_1 \omega);$$

$$M_1 = M_{\max} - c_1 e^{c_1 t}; \quad M_2 = M_{\max} - c_1 t;$$

$$M_3 = M_{\max} e^{-kt}; \quad M_4 = M_5 + M_6 e^{kt}.$$

В результаті досліджень отримали, що кращим показником керуючого впливу по моменту $M(t)$ є M_4 , а по потокозчепленню $\Psi_{rm}(t)$ – закон формування згідно виразу Ψ_3 . При цьому параметри моделі: для M_4 : $M_{\max} = 4000$ Нм; $C_1 = 0.1$; $M_5 + M_6 = 4000$ Нм; для Ψ_3 : $C_1 = 14$; $C_2 = 2$; $K_1 = 0.01$; $C_3 = 1.0$; $K_2 = 0.01$.

На рис. 1 приведені перехідні процеси у вигляді осцилограм, що демонструють роботу моделі при різних законах управління потокозчепленням Ψ_{rm} .

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 електропривода,

зокрема, розгін дизель-поїзда за заданий час t і оцінювалися отримані характеристики (швидкість, пройдений шлях і енергетичні витрати).

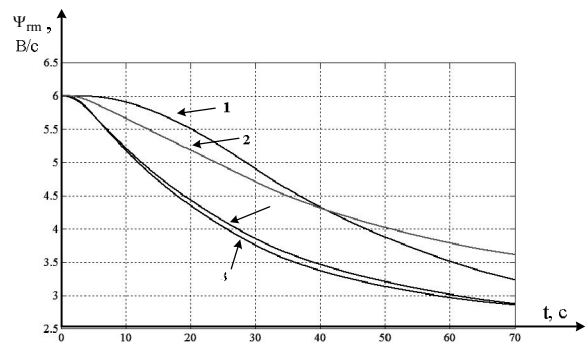


Рис. 1. Процеси зміни законів управління по потокозчепленню

При одночасному використанні кращих показників керуючих впливів по потокозчепленню $\Psi_{rm}(t)$ та моменту $M(t)$ отримані мінімальні показники енергетичних витрат при розгоні дизель-поїзду при виконанні обмежень по величині пройденого шляху і швидкості в кінцевий момент часу.

Таблиця 1 – Результати досліджень при найкращих законах $\Psi_{rm}(t)$ та $M(t)$

№	p/J	t, с	V, км/г	S, м	P ₁ , кВт/с	P ₂ , кВт/с
1	0,0001	60	56.47	500.2	8419	8798
2	0,0002	60	59.18	620.3	8658	8832
3	0,0006	60	64.15	812.8	8852	9159

В табл. 1 порівняно показники енергетичних витрат моделей, які були отримані з використанням векторного управління (P_1) та амплітудно-частотного управління (P_2). Отримані результати зрівняно з показниками моделі, яка реалізована на основі метода амплітудно-частотного керування. Показники енергетичних витрат отриманої векторної моделі керування (P_1) при максимальній загрузці на 4.5% менше ніж у моделі амплітудно-частотного керування (P_2).

Висновки

1. Розроблені математичні і машинні моделі електроприводу дизель-поїзда можуть бути використані для дослідження і уточнення параметрів системи управління, що розробляється, а також виконання коректування алгоритмів, отриманих в результаті розробки системи керування, що оптимізує енергетичні показники.

2. Отримані аналітичні співвідношення можуть бути використані для розробки структури САР електроприводу дизель-поїзда і розрахунку її параметрів при задані певного критерію якості (точність приведення в задану точку фазового простору, якості перехідних процесів, енергетичних витрат на виконувану роботу).

3. Запропоновані математичні моделі, алгоритми законів управління, аналітичні співвідношення для визначення параметрів САР реалізовані у вигляді машинної моделі і проведені за її допомогою дос-

лідження, показали перспективність такого підходу при розробці сучасних ефективних систем управління електроприводом дизель-поїздів з тяговими двигунами змінного струму.

4. На підставі проведених досліджень і порівнянні результатів отриманих на моделі як в статичних так і в динамічних режимах в різних точках тягової характеристики і за різних умов розгону дизель-поїзда встановлено, що процес розгону при синтезованих законах управління стійкий. При

цьому виконуються вимоги щодо точності приведення об'єкта управління в задану точку фазового простору і якості перехідних процесів.

5. Розроблена модель системи векторного керування ТАД та запропоновані закони управління дозволяють оптимізувати роботу енергетичної системи дизель-потяга 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.
2. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями : Учебное пособие / А.А. Усольцев СПб: СПбГУ ИТМО, 2002. – 43 с.
3. 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. Даргау – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
4. Bose Bimal K. Modern Power Electronics and AC drives / Bimal K. Bose. – Prentice 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-Regelung 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 // *Published in 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. Волков А.В. Быстродействующее векторное регулирование статорного тока в частотно-управляемых асинхронных электроприводах с широтно-импульсной модуляцией / А.В. Волков // *Техн. електродин.* – 2004. – №1. С. 35–42.

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

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 10.06.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2018

Синтез управлений для оптимизации динамических процессов электропривода переменного тока

Н. Й. Заполовский, В. В. Скороделов, Н. В. Мезенцев

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 как стандартные системы управления так и современные варианты с использованием алгоритмов векторного управления. Построены математические модели и структурные схемы исследуемых объектов, 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 качества. Синтезированы законы управления, обеспечивающих устойчивый разгон дизель-поезда как в статических так и в динамических режимах 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

Synthesis of controls for optimization of dynamic processes of an AC drive

M. Zapolovsky, V. Skorodelyov, M. Mezentsev

The questions of development and research of models for the synthesis of control systems of an 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 field are reviewed. Both standard control systems and modern variants are considered with the use of vector control algorithms. Mathematical models and structural diagrams of the investigated objects are constructed, and their functioning is simulated. The obtained analytical relationships, which can be used to develop the structure of ATS electric drive diesel trains and calculate its parameters when setting a certain quality criterion. The control laws that ensure stable acceleration of the diesel train in both static and dynamic modes at various points of the traction characteristic are synthesized and requirements for the accuracy of bringing the control object to a given point in the phase space and the quality of the transient processes are fulfilled.

Keywords: synthesis of control systems, electric drive of alternating current, vector control algorithms, mathematical model.