

М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев

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

ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ СИНТЕЗУ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМУ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛІННЯ

Анотація. Розглянуті питання розроблення оптимізаційної моделі для синтезу системи керування тяговим електроприводом змінного струму дизель-поїзда та її дослідження, з використанням сучасних методів оптимізації на основі математичних моделей і алгоритмів векторного способу управління. В процесі рішення: розроблено математичні моделі елементів систем тягового електроприводу дизель-поїзда з урахуванням протікання в них електромагнітних процесів; проведено аналіз і вибір методів оптимізації та критеріїв якості, характерних для даного типу об'єктів керування, які можливо використовувати для синтезу системи управління електроприводу дизель-поїзда з урахуванням математичної моделі, яка описує динамічні процеси; проведено розроблення оптимізаційних моделей системи керування електроприводу електропередачі дизель-поїзда з використанням характерних для даного типу електропередачі критеріїв якості; виконані дослідження та уточнення на оптимізаційних моделях структур і параметрів системи керування як з відомими законами управління, так і з запропонованими в процесі синтезу.

Ключові слова: оптимізаційна модель, електропривід змінного струму, синтез, методи оптимізації, математичні моделі, критерії якості, динамічні процеси, дослідження та уточнення, структури.

Вступ

Розроблення оптимізаційних математичних моделей для синтезу системи керування електроприводом змінного струму з використанням сучасних методів проектування, методів оптимізації з урахуванням особливостей об'єкта керування, різного роду програм і пакетів моделювання, проведення комплексних досліджень за допомогою моделей та отримання якісних характеристик функціонування системи керування в замкнутій системі управління в залежності від умов експлуатації та рівня навантаженості дизель-поїзда є складовою частиною загального завдання створення енергоекономної системи управління засобами залізничного транспорту.

Постановка задачі розроблення моделі. На сьогоднішній день наряду з частотним способом керування електроприводом (закон керування $U/f=const$), все більшої уваги приділяється розробкам систем керування на основі алгоритмів векторного управління [1 – 10]. Основна ідея алгоритму векторного управління полягає в змозі орієнтування потоку асинхронного двигуна (АД), що дає можливість розроблення систем керування електроприводом, яка забезпечує підтримку постійного значення електромагнітного моменту двигуна при змінах його навантаження.

Регулювання моменту здійснювалося тільки зміною роторної складової струму, що створює момент двигуна. В результаті система керування містить два канали управління: по тяговому моменту і потокозчепленню. Ці алгоритми активно впроваджується у різного роду електроприводах трифазного струму. Напроти статора системи рівняння математичної моделі асинхронного двигуна визначаються по рівнянням векторного управління.

Це важливо для об'єктів, наприклад, станків для обробки деталей за допомогою різальних інструментів. За допомогою алгоритму векторного управління можливо побудувати систему керування,

яка забезпечує стабілізацію певних струмів, а значить і самого електромагнітного моменту.

Характерною особливістю тягового електроприводу дизель-поїзда є те, що важливою експлуатаційною характеристикою являються енергетичні витрати. В залежності від профілю шляху, завантаженості при одній і тій же величині моменту, енергетичні витрати будуть різні. Для розроблення оптимізаційної моделі використано математичну модель алгоритму векторного управління, але за умови, що значення модуля потокозчеплення не стабілізується, а може змінюватися згідно заданого або синтезованого закону керування. При цьому ефективність функціонування системи керування оцінюється заданим критерієм якості.

В результаті отримана математична модель у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку, де фазовими змінними виступають швидкість руху дизель-поїзда та модуль потокозчеплення. В якості критерія ефективності використовуються показник енергетичних витрат. Це дозволяє проводити синтез управлінь з використанням методів варіаційного числення.

Для оцінки синтезованих управлінь використано порівняння отриманих значень перехідних процесів перемінних АД (потокозчеплень, фазних струмів, ковзань) із значеннями перехідних процесів при залученні відомого закону управління $U/f = Const$.

Для реалізації математичної моделі використано пакет MATLAB. Що до рішення даних задач у своєму складі він має об'єктно-орієнтовану алгоритмічну мову, графічний інтерфейс, засоби розв'язання задач математичного аналізу, оптимізації, обчислювальної математики, аналізу і синтезу систем автоматичного керування та ряд інших інструментів.

Метою роботи є розроблення моделей для синтезу системи керування електроприводом змінного струму дизель-поїзда та їх дослідження як з відомими

ми законами управління, так і з використанням моделі алгоритму векторного управління, проведення їх досліджень, отримання якісних характеристик протікання перехідних процесів в елементах електроприводу дизель-поїзда шляхом моделювання.

Основна частина

Згідно [4, 5] математичну модель електроприводу з урахуванням алгоритму векторного керування можливо подати в наступному вигляді:

$$U_{s1} = \frac{dI_{s1}}{dt} L_X + K_r \frac{d\Psi_{r1}}{dt} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi + R_s I_{s1}; \quad (1)$$

$$U_{s2} = \frac{dI_{s2}}{dt} L_X + I_{s1} L_s' \omega_\Psi + K_r \Psi_{rm} + R_s I_{s2}; \quad (2)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{rm}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r}; \quad (3)$$

$$0 = \beta \Psi_{rm} - \frac{R_r L_m}{L_r} I_{s2}; \quad (4)$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2}, \quad (5)$$

де $L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$, $K_r = \frac{L_m}{L_r}$, m – число фаз, p – число пар полюсів, K_r – коефіцієнт зв'язку ротора, ω – швидкість обертання ротора.

Оскільки швидкість обертання координат співпадає із швидкістю вектору потоку ротора $\omega_k = \omega_\Psi$, то вектор Ψ_r буде на осі 1 своїм модулем Ψ_{rm} , а його проекція на вісь 2 дорівнює нулю.

Згідно системи рівнянь потік ротора Ψ_{rm} повинен бути стабільним, отже стабільним і струм I_{s1} . Рівняння (1 – 5) при цьому спрощуються:

$$U_{s1} = R_s I_{s1} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi; \quad (6)$$

$$U_{s2} = R_s I_{s2} + I_{s1} L_s' \omega_\Psi + K_r \Psi_{rm} \omega_\Psi + \frac{dI_{s2}}{dt} L_s'; \quad (7)$$

$$\frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r} = 0. \quad (9)$$

З рівняння (8) виходить закон формування струму I_{s1} , що визначає потік:

$$I_{s1} = \frac{1}{L_m} \Psi_{rm}. \quad (10)$$

З рівняння (5) виходить закон формування струму I_{s2} , що визначає момент:

$$I_{s2} = \frac{M}{\Psi_{rm}} \frac{2}{mpK_r}. \quad (11)$$

З рівняння (9) знаходиться величина абсолютного ковзання β , що визначається моментом і поточкозчепленням:

$$\beta = \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{I_{s2}}{\Psi_{rm}}. \quad (12)$$

Необхідна швидкість обертання поля ротора визначається як:

$$\omega_\Psi = p\omega + \beta. \quad (13)$$

Дослідження системи керування за допомогою розробленої моделі показало малий вплив β на перехідні процеси, тому можливо прийняти [4, 5]:

$$\omega_s = \omega_\Psi. \quad (14)$$

Формування модуля вектору напруги U_{x1} математичної моделі тягового асинхронного двигуна (ТАД) в синхронній системі координат для регулювання напруги живлення виконується на основі ортогональних складових вектору напруги по зворотній моделі двигуна, які обчислюються згідно формул:

$$U_{s1} = R_s I_{s1} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi; \quad (15)$$

$$U_{s2} = R_s I_{s2} + \omega_s \Psi_{rm} \left(\frac{L_s'}{L_m} + K_r \right). \quad (16)$$

З урахуванням рівнянь (10) та (11) в результаті отримаємо:

$$U_{s1} = (R_s / L_m) \Psi_{rm} - \frac{M}{\Psi_{rm}} \frac{2}{mpK_r} L_s' \omega_s; \quad (17)$$

$$U_{s2} = R_s \frac{2}{mpK_r} \frac{M}{\Psi_{rm}} + \omega_s \Psi_{rm} \left(\frac{L_s'}{L_m} + K_r \right); \quad (18)$$

$$\beta = \frac{R_r L_m}{L_r} \frac{2}{mpK_r} - \frac{M}{\Psi_{rm}} \frac{1}{\Psi_{rm}}. \quad (19)$$

З урахуванням значень параметрів тягового двигуна дизель-поїзда ($R_s = 0.083$ (Ом); $R_r = 0.068$ (Ом); $L_m = 0.0866$ (мГн); $L_s = 0.0880$ (мГн); $K_r = 0.982$; $L_s' = 0.003$ (мГн); $L_r = 0.088215$ (мГн)) ортогональні складові вектору напруги та величина абсолютного ковзання β визначаються як:

$$U_{s1} = 0.958 \Psi_{rm} - 0.000679 \frac{M}{\Psi_{rm}} \omega_s; \quad (20)$$

$$U_{s2} = 0.0188 \frac{M}{\Psi_{rm}} + 1.017 \omega_s \Psi_{rm}; \quad (21)$$

$$\beta = 0.0151 \frac{M}{\Psi_{rm}} \frac{1}{\Psi_{rm}}; \quad (22)$$

Модуль вектору напруги живлення для математичної моделі ТАД визначається на основі рівнянь (20) і (21):

$$U_{x1} = \sqrt{U_{s1}^2 + U_{s2}^2}. \quad (23)$$

В результаті отримали математичну модель формування модуля вектору напруги U_{x1} та величини абсолютного ковзання β для математичної

моделі двигуна в синхронній системі координат на основі алгоритму векторного управління з урахуванням конкретних конструктивних параметрів ТАД електроприводу дизель-поїзда, яка в подальшому, сумісно з моделлю ТАД в синхронній системі коор-

динат була використана для дослідження можливих законів керувань.

Структурна схема моделі формування складових керувань U_{x1} та w_s на основі рівнянь (20) - (23) приведена на рис. 1.

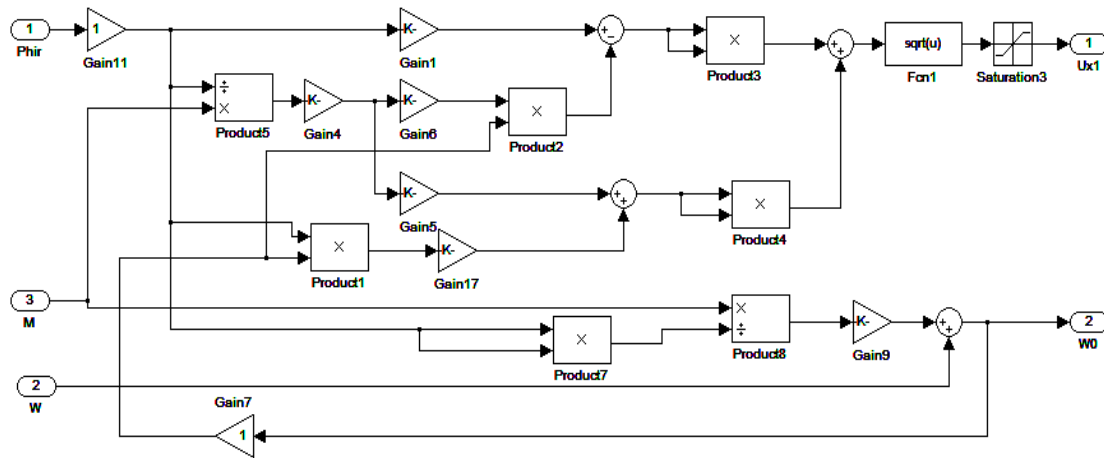


Рис. 1. Структурна схема моделі формування складових керувань

В процесі досліджень створена узагальнена модель електромеханічної системи дизель-поїзда, яка включає в себе наступні блоки моделей: формування керувань на основі математичної моделі – рівняння (20) – (23); моделі тягового електроприводу та формування швидкості дизель-поїзда [4]. Сигналами управління для моделі тягового електроприводу являються модуль вектору напруги живлення ТАД U_{x1} та його частота ω_0 (швидкість обертання поля ротора), які формуються на основі відомих законів керування (наприклад, $U/f = const$), синтезованих або запропонованих. Як один з варіантів можливо формувати закони керування з використанням алгоритму векторного управління на основі інформації поведінки зміни тягового моменту та поточкозчеплення, як управління.

Формування частоти ω_0 (швидкості обертання поля ротора) виконується з використанням сигналу механічної частоти ω (рівняння (13)), який отримується на виході блоку моделі електроприводу.

У даній моделі розглядається оптимізаційний показник – енергетичні витрати при переміщенні об'єкту управління на задану відстань до певної швидкості. Витрати визначалися як

$$J = \int_{t_0}^T U_{1m} I_s dt,$$

де U_{1m} – амплітудне значення напруги живлення ТАД (В), I_s – струм навантаження (А).

За допомогою узагальненої моделі проведено дослідження можливих законів керування, таких як $U/f = const$, та законів керування з використанням алгоритму векторного управління на основі інформації поведінки зміни тягового моменту та поточкозчеплення.

Так, при проектуванні систем керування електроприводу змінного струму, в яких застосовуються

тягові асинхронні двигуни (ТАД), одним із способів управління використовується закон керування $U/f = const$. Однак, для конкретної системи, в нашому разі це стосується електроприводу дизель-поїзда, необхідно визначити чисельне співвідношення цього закону та значення темпу зміни частоти f напруги живлення U .

У зв'язку з цим дослідження проводились для певної величини завантаженості дизель-поїзда (розрахунковій, номінальній і максимальній) та темпу наростання частоти напруги живлення ТАД. При цьому величина завантаженості визначалась коефіцієнтом p/J . Відповідно коефіцієнти приймали значення: 0.000071; 0.000066; 0.000063.

Характерні результати дослідження системи керування електроприводу при законі керування $U/f = const$ приведені в таблицях 1 – 3. При цьому аналізувались графіки зміни модуля поточкозчеплення, частоти скочвання, тягового моменту, швидкості дизель-поїзда при різних чисельних значеннях U/f , рівнях завантаженості дизель поїзда та витрати енергії електропередачі за час розгону.

Аналіз процесів показує, що при допустимих межах завантаженості і темпі наростання сигналу управління до 0.7 Гц/сек процес розгону носить стійкий характер і параметри системи (величина тягового моменту, величина ковзання, швидкість дизель-поїзда) знаходяться в допустимих межах, які задаються технічними вимогами. При темпі наростання сигналів керування більше за 0.7 Гц/сек система керування не забезпечує нормальне функціонування. Так, при темпі наростання сигналів керування 0.8 Гц/сек, величина ковзання при максимальному завантаженні виходить за допустиму (не реальну) величину. При цьому і тяговий момент ТАД не відповідає технічним вимогам.

В табл. 1 – 3 приведені цифрові значення відповідних змінних моделі (поточкозчеплення (Ψ_{rm} , (В), швидкості руху дизель-поїзда (V , км/год), ви-

трат енергії (P , кВт*сек), тягового моменту (M , Нм), частота скочвання ($\omega_0 - \omega$) при відповідній завантаженості дизель-поїзда та темпі наростання сигналів керування ($p/J=0.000071$, $p/J=0.000066$, $p/J=0.000063$ за $t=100$ сек.; темп наростання частоти – 0.4 та 0.7 Гц/сек.) в залежності від конкретних значень закону управління $U/f = const$.

Із табл. 1 видно, що при заданому темпі наростання частоти напруги живлення ТАД за умови використання законів управління $U/f = const$ в діапазоні їх можливих робочих від 8 до 14, значення величини тягового моменту залишається практично постійним, при зменшенні значення відношення $U/f = const$ швидкість руху зменшується, а витрати енергії збільшуються. При цьому величина скочвання збільшується. Це дає підстави для заключення, що модель адекватна і являється можливою для проведення досліджень.

В табл. 2 приведено результати досліджень при заданому темпі наростання частоти напруги живлення ТАД за умови різного рівня завантаженості при використанні закону управління $U/f = 10$.

Таблиця 1 – Результати досліджень ($p/J=0.000071$, $t=100$ с.; темп наростання частоти – 0.4 Гц/с.)

U/f , В/Гц	Ψ_{rm} , В	V , км/год	P^*10 , МВт	M , Нм	$\omega_0 - \omega$, рад/сек
14	2.21	38.34	2.67	925	2.991
10	1.57	37.83	2.70	925	6.268
8	1.25	37.01	3.05	925	11.64

Із табл. 2 видно, що при заданому темпі наростання частоти напруги живлення ТАД за умови різного рівня завантаженості при використанні закону управління $U/f = 10$, темпі наростання частоти напруги живлення ТАД – 0.4 Гц/сек значення величини тягового моменту зростає в залежності від збільшення завантаженості дизель-поїзда, що є нормальним явищем. При цьому звичайно проявляється і збільшення затраченої енергії для досягнення однієї і той же швидкості в кінцевий термін часу. Характерним процесом при цьому є те, що практично для можливих завантажень залишається постійною величина частоти скочвання та потокозчеплення. Це додатково, як і в попередньому результаті дослідження підтверджує, що згідно теорії положень електроприводу, розроблена модель з точки зору функціонування веде себе адекватним чином.

Таблиця 2 – Результати досліджень ($U/f = 10$; $t = 100$ с.; темп наростання частоти – 0.4 Гц/с.)

p/J	Ψ_{rm} , В	V , км/год	P^*10 , МВт	M , Нм	$\omega_0 - \omega$, рад/сек
0.000071	1.575	37.83	2.696	924.8	6.268
0.000066	1.573	37.76	2.900	985.3	6.766
0.000063	1.573	37.70	3.042	1026.	7.115

В табл. 3 приведено результати досліджень при критичному значенні темпе наростання частоти напруги живлення ТАД за умови максимального рівня завантаженості при використанні допустимих законів управління $U/f = const$.

Таблиця 3 – Результати досліджень ($p/J=0.000063$, $t=100$ с.; темп наростання частоти – 0.7 Гц/с.)

U/f , В/Гц	Ψ_{rm} , В	V , км/год	P^*10 , МВт	M , Нм	$\omega_0 - \omega$, рад/сек
12	1.895	66.58	8.548	1728.0	8.587
11	1.734	66.19	9.472	1728.0	11.11
10	1.573	64.67	12.78	1793.0	21.68

В результаті досліджень встановлено, що максимальний (критичний) темп набору частоти напруги живлення ТАД становить 0.7 Гц/сек. Із табл. 3 видно, що оптимальним є закон керування $U/f = 12$. Так, при заданому темпі наростання частоти напруги живлення ТАД за умови розгону до однієї і тієї ж швидкості, мінімальними значеннями є споживча енергія і величина частоти скочвання. Як правило, ці показники вибираються як цільові (якісні) при синтезі оптимальних систем керування.

В загальному плані можна визначити, що розроблену модель, на якій проведено ряд досліджень законів управління, можливо застосувати при синтезі оптимальних законів керування електроприводом змінного струму в плані отримання їх достовірності і протікання характерних процесів в системах електроприводу. Наприклад, такими характеристиками можуть бути отримані при синтезі закону управління відношення амплітуди напруги живлення до її частоти U/f , темпі наростання швидкості дизель-поїзда в залежності від завантаження, значеннях енергетичних затрат.

Крім цього, за результатами досліджень можливо зробити висновок, що розроблена модель реально відображає процес функціонування електроприводу дизель-поїзда при допустимих навантаженнях і розглянутому методі управління з точки зору протікання електромагнітних процесів і, як результат, може бути використана для цілей дослідження синтезованих управлінь згідно інших алгоритмів керування.

За допомогою розробленої моделі також були проведені дослідження щодо використання можливих керувань згідно алгоритму векторного управління. Так, при побудові системи керування з використанням методів векторного управління передбачається, що здійснюється стабілізація потокозчеплення Ψ_{rm} і тягового моменту, який визначається завданням M_3 . Такий принцип регулювання традиційний і використовується незалежно від того, в якій системі координат представляється модель об'єкту управління.

Формування законів зміни тягового моменту ТАД і потокозчеплення виконувалось згідно наступних співвідношень. За тяговим моментом:

$$M = 2000 - e^{-0.01t}; \quad M = 2000 - 1/5t;$$

$$M = 2000e^{-0.0008t}; \quad M = 1600 + 1200e^{-0.0325t}.$$

За потокозчепленням:

$$\Psi_{rm} = 12 / (2 + 0.01\omega); \quad \Psi_{rm} = 12 / (2 + 0.01\omega^* \omega);$$

$$\Psi_{rm} = (14 / (2 + 0.01\omega)) - e^{-0.01t};$$

$$\Psi_{tm} = 8.17 - 13 / ((14 / (2 + 0.1\omega)) - (1 / e^{0.01t})).$$

В процесі досліджень проведено аналіз перехідних процесів у вигляді осцилограм, отриманих на моделі, що демонструють функціонування систем електроприводу при визначених початкових умовах у замкненій системі керування. Сигнали керування формувались згідно запропонованих законів управління тяговим моментом ТАД та поточозчепленням. Ефективність відповідного закону управління оцінювалась за значеннями величини енергетичних витрат.

Результати дослідження моделі дизель-поїзда з електроприводом змінного струму приведено у вигляді табл. 4 та 5. Характер зміни значень потоко-

зчеплення та діапазон зміни його значень співпадають з характером процесів при відомому способі керування $U/f = const$, що було досліджено і приведено вище.

Відповідно до законів керування отримано показники витрат енергії (у вигляді споживчої потужності тяговим електроприводом та числових значень функціоналу) при розгоні дизель-поїзда при максимальній завантаженості в залежності від швидкості руху та пройденого шляху за певний проміжок часу ($t = 100$ сек.).

Як критерій оптимальності використовувався критерій мінімуму енергетичних витрат при виконанні обмежень по величині пройденого шляху і швидкості в кінцевий момент часу.

Таблиця 4 – Результати досліджень ($p/J=0.000063$, $t=100$ сек.; $\Psi_{tm} = 12 / (2 + 0.01\omega)$).

M	Ψ_{tm} , В	V, км/год	$P*10$, МВт	S, м	$\omega_0 - \omega$, рад/сек	P/S, кВт/м	U/f, В/Гц
1	2.32	87.7	1.73	1105	3.86	1.56	14.68
2	2.29	87.4	1.72	1132	3.64	1.52	14.47
3	2.29	87.2	1.72	1130	3.62	1.52	14.49
4	2.22	87.8	1.75	1243	3.26	1.40	14.05

Таблиця 5 – Результати досліджень ($p/J=0.000063$, $t=100$ сек.; $\Psi_{tm} = (14 / (2 + 0.01\omega)) - e^{-0.01t}$)

M	Ψ_{tm} , В	V, км/год	$P*10$, МВт	S, м	$\omega_0 - \omega$, рад/сек	P/S, кВт/м	U/f, В/Гц
1	2.28	88.9	1.71	1111	4.18	1.54	14.4
2	2.24	88.7	1.70	1139	3.94	1.49	14.2
3	2.25	88.4	1.70	1137	3.91	1.49	14.2
4	2.17	89.3	1.71	1254	3.55	1.36	13.7

Розглядалися варіанти впливу ряду можливих законів задання тягового моменту та поточозчеплення, як управління, в процесі розгону дизель-поїзда за заданий час t і оцінювались отримані характеристики (швидкість, пройдений шлях і енергетичні витрати). За отриманими даними досліджень можливо запропонувати певні закони керувань з точки зору їх ефективності за критерієм мінімуму енергетичних витрат.

Аналіз отриманих даних дає підстави запропонувати закон зміни за тяговим моментом згідно виразу

$$M = 1600 + 1200e^{-0.0325t},$$

за поточозчепленням:

$$\Psi_{tm} = (14 / (2 + 0.01\omega)) - e^{-0.01t}.$$

Такий висновок зроблено на основі наступного. Отримані дані для пропонуємих керувань в деякій мірі аналогічні даним отриманим по перехідним процесам в результаті досліджень використання відомого закону керування $U/f = const$. При цьому при різних рівнях завантаженості дизель-поїзда, такі показники як величина поточозчеплення, швидкість руху поїзда, пройдений шлях знаходились в межах, які визначаються експлуатаційними значеннями характеристик. Якщо порівняти дані перехідних процесів законів керування $U/f = const$ і пропонуємого закону керування, із таблиці 5 видно, що в пропонуємому законі керування досягається

співвідношення $U/f = 13.7$ при темпі наростання частоти напруги живлення ТАД 0.76 Гц/сек. Цей факт, крім мінімальних витрат енергії, додатково дає підтвердження про його доцільність використання.

Виходячи з проведених результатів дослідження за допомогою розроблених моделей на основі використання алгоритму векторного управління електроприводом можна зробити висновок, що запропоновані керування дозволяють оптимізувати роботу енергетичної системи дизель-поїзда в процесі розгону при робочих завантаженнях, забезпечуючи при цьому виконання заданих граничних умов по швидкості та пройденому шляху, а також проводити розроблення та дослідження аналогічних систем управління.

Висновки

1. На основі розглянутих методів синтезу та урахуванням особливостей досліджуваного об'єкта слідує, що з метою побудови енерго-ефективної системи керування у вигляді математичних моделей для певних критеріїв якості та алгоритмів формування завдань у відповідності до векторного управління можуть бути використані методи варіаційного числення.

2. За умови застосування методів варіаційного числення для синтезу моделі енерго-ефективної системи керування пропонується використати оптимізаційний показник – енергетичні витрати при пере-

міщенні об'єкту управління (дизель-поїзда) на задану відстань до певної швидкості.

3. В результаті досліджень встановлено, що при заданому (критичному) темпі наростання частоти напруги живлення ТАД 0.7 Гц/сек за умови максимальної завантаженості дизель-поїзда і розгону до однієї і тієї ж швидкості при мінімальному значенні споживчої енергії і величині частоти ковзання, оптимальним є закон керування $U/f = 12$.

4. В процесі досліджень проведено аналіз перехідних процесів, отриманих на моделі, що демонструють функціонування систем електроприводу при використанні запропонованих управлінь тяговим моментом АД та потокозчепленням у замкненій системі керування. Отримані дані для пропонуємих керувань аналогічні даним отриманим по перехідним процесам в результаті досліджень використання відомого закону керування $U/f = const$, що дає підставу стверджувати про їх адекватність та працездатність.

5. Аналіз даних, які отримані в процесі досліджень, дає підстави запропонувати закон управління тяговим моментом та потокозчепленням у відповідності із співвідношеннями:

$$M = 1600 + 1200e^{-0.0325t}$$

$$\Psi_{rm} = (14 / (2 + 0.01\omega)) - e^{-0.01t}$$

6. В процесі досліджень встановлено, що при використанні запропонованого закону керування при різних рівнях завантаженості дизель-поїзда, такі показники як величина потокозчеплення, швидкість руху поїзда, пройдений шлях знаходяться в межах, які визначаються експлуатаційними значеннями характеристик. При цьому досягається співвідношення $U/f = 13.7$ при темпі наростання частоти напруги живлення АД 0.76 Гц/сек. Цей факт, крім мінімальних витрат енергії, додатково (збільшення швидкодії) дає підстави про доцільність його використання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Horstmann Daniel, Wagner Rudolf, Weigel Wolf-Dieter. 100 Jahre Entwicklung der Antriebsstechnik für elektrische Bahnen. Teil 2. // *Elek. Bahnen*. – 2003. – № 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. – Prentice Hall PTR: Prentice-Hall Inc. – 2002. – 712 p.
5. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / [Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заповловский Н.И., Леонов С.Ю.]. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
6. 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.
7. 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.
8. Заповловський М.Й. Синтез управлінь для оптимізації динамічних процесів електроприводу змінного струму / М.Й. Заповловський, М.В. Мезенцев, В.В. Скорodelов // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Вип. 4(50). Полтава. 2018. С. 38-41.
9. Заповловський М.Й. Математична модель для синтезу управлінь електроприводом змінного струму / М.Й. Заповловський, В.В. Скорodelов, М.В. Мезенцев // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Вип. 5(57). Полтава. 2019. С. 16-21.

Received (Надійшла) 08.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

An optimization model for the synthesis of the control system of an alternating current electric drive based on the use of a vector control algorithm

M. Zapolovsky, M. Mezentssev

Abstract. Considered the issues of developing an optimization model for the synthesis of the AC traction electric drive control system of a diesel train and its research, using modern optimization methods based on mathematical models and vector control algorithms. In the process of the decision: mathematical models of the elements of the traction electric drive systems of the diesel train were developed, taking into account the flow of electromagnetic processes in them; the analysis and selection of optimization methods and quality criteria typical for this type of control objects, which can be used for the synthesis of the control system of the electric drive of a diesel train, taking into account the mathematical model that describes dynamic processes; the development of optimization models of the control system of the electric drive of the electric transmission of a diesel train using quality criteria typical for this type of electric transmission was carried out; studies and refinements were made on optimization models of the structures and parameters of the control system, both with known control laws and with those proposed in the synthesis process.

Keywords: optimization model, alternating current electric drive, synthesis, optimization methods, mathematical models, quality criteria, dynamic processes, research and refinement, structures.