

М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев, М. В. Оліфір

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА З УРАХУВАННЯМ ВИКОРИСТАННЯ ГУМО-КОРДОВОЇ МУФТИ В ПРОЦЕСІ БУКСУВАННЯ КОЛІСНИХ ПАР

Анотація. Розглянуті питання розроблення та дослідження моделей електроприводу змінного струму дизель-поїзда. Проведено огляд літературних джерел на задану тематику та аналіз існуючих підходів до розв'язання задач, пов'язаних з проблемами розроблення систем керування, які забезпечують збільшення ефективності використання електроприводу за умов експлуатації, в тому числі при можливому буксуванні колісних пар. Розглянуті як загально прийняті підходи проведення досліджень за допомогою моделювання процесів буксування колісних пар, так і запропоновані. Розроблені комп'ютерні компоненти електромеханічної системи дизель-поїзда з урахуванням пружних зв'язків за умови забезпечення якісних показників системи керування у його елементах в процесі буксування та моделі, що описує можливий процес буксування. Приведені моделі можуть бути використані для дослідження системи автоматичного регулювання електропередачі та уточнення її параметрів, крім того для визначення параметрів гумо-кордової муфти (ГКМ) і в подальшому їх реалізації у вигляді відповідних комп'ютерних компонентів системи керування дизель-поїзда. Проведено дослідження запропонованої моделі як з точки зору її адекватності, так і її можливості застосування для цілей розроблення системи керування, що забезпечує ефективність функціонування електроприводу з ГКМ в процесі буксування. Результати досліджень надано у вигляді графіків процесів характерних фазових змінних та таблиць, в яких наведені числові значення характерних змінних системи керування в залежності від сигналів управління.

Ключові слова: комп'ютерні компоненти, моделювання процесів буксування, електропривод змінного струму, дизель-поїзд, системи керування, буксування, пружні зв'язки, гумо-кордова муфта, адекватність, частота ковзання, графіки процесів, таблиці, сигнали управління.

Вступ

У процесі роботи механічного обладнання (редуктор, полий вал) дизель-поїзда виникають динамічні навантаження, особливо в процесі буксування колісних пар, що призводять до виходу з ладу деталей, вузлів і механізмів, у зв'язку з чим знижується його довговічність та експлуатаційна надійність. З урахуванням цього виникає необхідність у пошуку рішень, пов'язаних із збільшенням терміну служби елементів приводу та зниженням негативного впливу динамічних навантажень на обладнання. Одним з таких рішень є використання компенсуючих муфт. Муфти здатні демпфувати ударні навантаження, що виникають у процесі роботи обладнання. Математичний апарат для аналітичного розрахунку еластичних муфт та їх застосування в електроприводах достатньою мірою складний. У зв'язку з цим для моделювання умов навантаження, в тому числі і для можливого процесу буксування колісних пар дизель-поїзда та на цій основі виконувати обґрунтування та розрахунки електричних параметрів муфти з еластичними елементами пропонується використання розроблених математичних моделей та їх реалізації із застосуванням програмного комплексу пакету MATLAB. Такий підхід в якій то мірі вирішує проблему при створенні локомотивів з електроприводом змінного струму, зокрема розроблення комп'ютерних компонентів для системи управління, яка забезпечує ефективне використання зчепної ваги, де в електромеханічній системі використовується гумо-кордова муфта (ГКМ). У зв'язку з цим потрібно дослідження

динаміки дизель-поїзда з метою розробки сучасних систем управління, що забезпечують запобігання буксуванню або зведенню до мінімуму енергетичних витрат, з використанням математичних моделей як самого об'єкта в цілому, так і його окремих електромеханічних компонентів, блоків і вузлів.

Постановка задачі і аналіз відомих публікацій. Огляд робіт, присвячених задачі розробки ефективних систем управління електропередачі дизель-поїзда з електроприводом змінного струму показує, що в даний час значна увага приділяється створенню систем керування на основі сучасних досягнень проектування з використанням методів оптимізації, нечіткої логіки, нейрокомп'ютерних технологій, розробленням моделей електромеханічних компонентів, блоків і вузлів та їх дослідження [1 – 3]. Проблемам розроблення та дослідження моделей електромеханічної системи електроприводу змінного струму з урахуванням пружних зв'язків та умов зчеплення колісних пар із рейками присвячено ряд робіт [2, 3]. Практичний інтерес представляє математична модель, яка враховує реалізацію моменту обертання тягового асинхронного двигуна (ТАД) при взаємодії колісних пар із рейками, зокрема математична модель реалізації сили зчеплення колісних пар дизель-поїзда при втраті та відновленні зчеплення з урахуванням пружних зв'язків. В даній роботі розглядаються питання моделювання процесів динаміки дизель-поїзда, що виникають в елементах електромеханічної системи асинхронного електроприводу в залежності від навантаженості дизель-поїзда (наведеного моменту інерції) при порушенні умов зчеплення колісних пар із

рейками за умов використання в системі електроприводу гумо-кордової муфти.

Метою даної роботи є створення комп'ютерних компонентів для системи управління дизель-поїзду на основі математичної моделі електромеханічної системи дизель-поїзда з ТАД з урахуванням пружних зв'язків у його елементах в процесі буксування та моделі, що описує можливий процес буксування. Моделі дозволяють виконувати обґрунтування і розрахунки електричних параметрів муфти з еластичними елементами та проводити дослідження на стадії проектування при розробці комп'ютерних компонентів системи керування дизель-поїзду.

Основна частина

Однією з важливих задач, які зв'язані з проектуванням систем керування об'єктами, є розроблення математичної моделі електромеханічної системи дизель-поїзда для визначення структури і параметрів регуляторів системи управління, її динамічних і статичних характеристик у різних режимах функціонування для

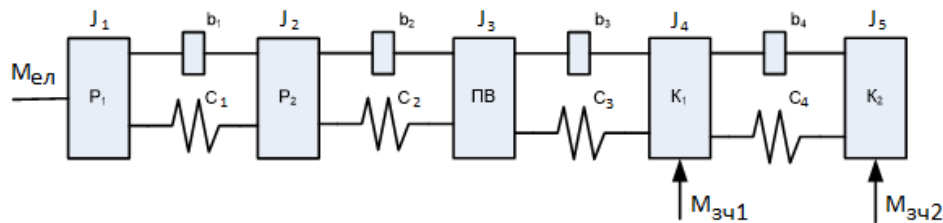


Рис. 1. Структурна схема електромеханічної системи дизель-поїзда

Для дослідження процесів буксування і впливу ГKM (параметрів муфти), приймаємо, що загальна модель системи складається з моделей: системи ГKM; еквівалентного електроприводу з небуксуючими колісними парами; електроприводу, колісні пари якого можуть бути в стані буксування; блоку формування керуючих впливів (напруги живлення ТАД і її частоти) та сигналу зворотного зв'язку обертання ротора буксуючого ТАД; блоку навантаження та формування швидкості руху дизель-поїзда. При цьому швидкість руху визначається сукупним тяговим моментом від усіх двигунів. Загальна структурна схема моделі дизель-поїзда наведена на рис. 2.

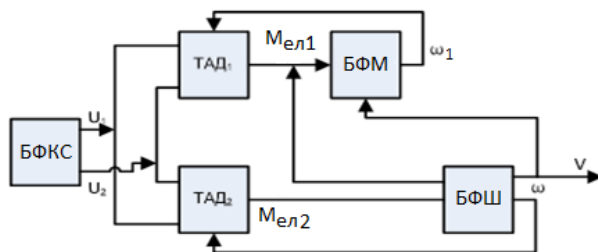


Рис. 2. Загальна схема моделі дизель-поїзда

Тут: БФКС – блок формування керуючих сигналів U_1, U_2 (напруги живлення ТАД та її частоти); ТАД₁ – тяговий асинхронний двигун (буксуючий); ТАД₂ – еквівалентний тяговий асинхронний двигун (небуксуючий); M_{el1}, M_{el2} – електромагнітний момент відповідного ТАД; БФМ – блок формування моменту зчеплення колісних пар з урахуванням пружних зв'язків;

забезпечення надійного функціонування об'єкта в цілому. Дану інформацію можливо отримати за допомогою експериментальних досліджень або шляхом математичного моделювання.

Структурну схему електромеханічної системи дизель-поїзда наведено на рис. 1 [2].

Тут: P_1 – ротор ТАД; P_2 – редуктор; ПВ – порожнистий вал; K_1, K_2 – колеса вісі дизель-поїзда.

Зв'язок ТАД із колісною парою дизель-поїзда у загальному випадку є пружним за рахунок скручування валів редуктора та колісної пари, пружної деформації колісної пари, а також сполучних муфт. На систему діють зовнішні моменти: обертаючий момент ТАД M_{el} , який прикладений до ротора і діє на колісну пару через редуктор і сполучну муфту та момент зчеплення колісної пари з рейками $M_{зч}$. З урахуванням припущень [2] окремі ланки можуть бути представлені у вигляді зосереджених матеріальних точок, що мають момент інерції ($J_1 - J_5$), а ідеалізовані зв'язки між ними характеризуються пружністю ($C_1 - C_4$) і дисипативними властивостями ($b_1 - b_4$).

БФШ – блок формування швидкості дизель-поїзда; ω , ω_1 – кругова швидкість обертання відповідної колісної пари. Залежно від цілей дослідження моделі ТАД₁ та ТАД₂ можуть бути представлені як з урахуванням середніх значень фазових змінних (в тому числі на основі методів векторного керування), так і миттєвих. Їх математичні моделі та моделі формування керуючих сигналів (блок БФКС) докладно описані у [3, 4]. В даній роботі використано математичну модель ТАД з урахуванням середніх значень фазових змінних. Формування керуючих сигналів виконувалось як з використанням частоти напруги живлення ω_e згідно розімкненого закону $U/f = \text{Const}$, так і замкненого закону $\omega_e = \omega_1 + \Delta S$ (ω_e – частота напруги живлення ТАД; ω_1 – кругова швидкість обертання небуксуючої колісної пари; ΔS – величина ковзання частоти (постійне значення або синтезоване). Значення амплітуди напруги живлення формувалось згідно заданого співвідношення $U/f = \text{Const}$.

Модель блоку формування моменту зчеплення колісних пар з урахуванням пружних зв'язків (БФМ) (згідно рис. 1) можна подати у вигляді двомасової [2, 5, 6], в якій визначальну роль відіграють параметри сполучної муфти (величина жорсткості – C , коефіцієнт в'язкого тертя – B). У цьому випадку структурна схема двомасової системи представлена зосередженими масами редуктора, валу двигуна і робочого механізму (колісними парами), між якими є пружний елемент (сполучна муфта), наведена на рис. 3.

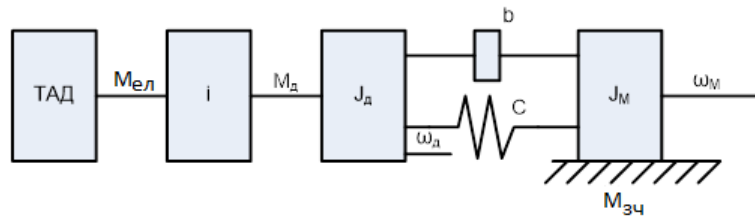


Рис. 3. Структурна схема двомасової системи

Тут вал ТАД з моментом інерції J_d пов'язаний з робочим механізмом (колісною парою) з моментом інерції J_m пружним зв'язком з коефіцієнтом жорсткості C і коефіцієнтом в'язкості тертя b . При цьому швидкість обертання ротора ТАД $\omega_d(t)$ не дорівнює швидкості механізму $\omega_m(t)$. Рівняння двомасової системи з урахуванням умов зчеплення колісних пар з рейками мають вигляд [2]:

$$\frac{d\omega_d}{dt} = \frac{1}{J_d}(M_d - M_{ne}), \quad (1)$$

$$M_{ne} = M_n + B(\omega_d - \omega_m), \quad (2)$$

$$\frac{dM_n}{dt} = C(\omega_d - \omega_m), \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_m}(M_{ne} - M_{зч}), \text{ якщо } M_{зч} < M_{ne}, \quad (4)$$

$$\omega_m = \omega, \text{ якщо } M_{зч} \geq M_{ве}, \quad (5)$$

де $M_{не}$ – сумарний момент, що передається пружним зв'язком, яка дорівнює сумі пружного моменту M_n і моменту в'язкого тертя; J_d, J_m – відповідно момент інерції двигуна та механізму, наведені до валу двигуна; M_d – тяговий момент ТАД з урахуванням редуکتора; ω_d, ω_m – відповідно швидкості обертання ротора ТАД та колісної пари; ω – кутова швидкість колісної пари, що не буксує; $M_{зч}$ – момент зчеплення колісної пари з рейками. $M_{зч}$ може бути визначений відповідно до «Правил тягових розрахунків» [2]. Слід відмітити, що згідно цих правил модель формування $M_{зч}$ носить евристичний характер і експериментальні дані є тільки до ряду локомотивів. Для дизель-поїздів мають рекомендаційний характер.

Моделювання процесів на основі представлення електромеханічної системи у вигляді двомасової (рис. 3) пропонується наступним чином. Згідно досліджень в процесі експлуатації ГМК визначено, що процеси, які відбуваються при формуванні тягового моменту дизель-поїзда в процесі руху, використовуючи електромагнітні моменти ТАД і ГМК, можуть здійснюватися згідно певних законів – експонентного або коливального. Згідно фізичних властивостей математичну модель ГМК за певних умов можливо представити передавальною функцією вигляду:

$$W(p) = \frac{Y}{X} = \frac{k}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}, \quad (6)$$

де Y – зображення вихідного сигналу муфти; X – зображення вхідного сигналу муфти; k – коефіцієнт передачі; T_1, T_2 – постійні часу (с).

В залежності від значень T_1, T_2 , зображення вихідної величини Y за умови постійного зображення

величини X може змінюватись згідно експоненціального або коливального закону. Таке представлення математичної моделі дозволяє проводити дослідження в певному спектрі можливих змін особистих частот (періоду коливаний) та швидкості їх затухання, що дає можливість в певному сенсі визначати електричні параметри ГМК (значення b і C). Згідно передавальної функції (6) модель ГМК представлена лінійним диференціальним рівнянням другого порядку:

$$y''(t) + a_1 y'(t) + a_2 y(t) = x(t), \quad (7)$$

де a_1 і a_2 – постійні величини, значення яких визначається постійними часу T_1 і T_2 . Рішення рівняння (7) представляється сумою вигляду:

$$y(t) = y_o(t) + y_b(t). \quad (8)$$

Складова рівняння (8) $y_o(t)$ визначає характер перехідного процесу і визначається як:

$$y_o(t) = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t}, \quad (9)$$

де C_1, C_2 – визначаються початковими умовами рівняння (7); k_1, k_2 – корні однорідного характеристичного рівняння, яке відповідає рівнянню (7). В залежності від виду коренів (дійсні чи комплексні) отримаємо і відповідний характер перехідного процесу – експоненціальний чи коливальний. Складова $y_b(t)$, яка визначає реакцію системи в залежності від типу $x(t)$. За умови постійного значення $x(t)$, $y_b(t)$ буде визначатись як:

$$y_b(t) = x(t) / a_2. \quad (10)$$

Задання орієнтованих значень частоти (періоду) особистих коливаний в процесі досліджень з метою оцінки та вибору електричних параметрів b і C можливо на основі рішення диференціального рівняння вигляду:

$$y''(t) + \omega^2 y(t) = 0 \quad (11)$$

при заданих початкових умовах.

Аналітичне рішення рівняння (11):

$$y(t) = A \sin \omega t,$$

де значення A визначаються початковими умовами рівняння (11). В результаті орієнтоване значення частоти ω в рівнянні (11) пов'язане з коефіцієнтом a_2 рівняння (7).

Рішення однорідного диференціального рівняння (11) дає нам змогу в моделі задавати частоту (період) особистих коливаний, які характерні для ГМК, що використовується в даному електроприводі.

Згідно аналітичного рішення рівняння (9) за допомогою коефіцієнта a_1 рівняння (7) в моделі є змога задавати швидкість затухання коливань ГKM. Для оцінки параметрів ГKM використано прямі показники якості: час керування; величина перерегулювання (абсолютне значення максимального відхилення); коливальність.

При дослідженнях за умови використання ГKM практичний інтерес представляє процес формування тягового моменту в результаті буксування колісних пар дизель-поїзда та вплив ГKM на процес формування тягового моменту дизель-поїзда. При цьому береться до уваги, що процес буксування носить дискретний характер. Тобто зміна тягового моменту також носить дискретний характер. В результаті в процесі моделювання з урахуванням ГKM тяговий момент за умов стрибко-подібної зміни електромагнітного моменту згідно рівняння (10) будемо визначати як:

$$M_{\partial} = y(t)\sqrt{a_2}. \quad (12)$$

Згідно [7, 8] математичну модель ТАД представлена у вигляді:

$$\frac{d\Psi_{s1}}{dt} = \Psi_{s2}\omega_s - R_S I_{s1} - U_{s1}. \quad (13)$$

$$\frac{d\Psi_{s2}}{dt} = -\Psi_{s1}\omega_s - R_S I_{s2} - U_{s2}. \quad (14)$$

$$\frac{d\Psi_{r1}}{dt} = (\omega_s - p\omega)\Psi_{r2} - R_R I_{r1}. \quad (15)$$

$$\frac{d\Psi_{r2}}{dt} = -(\omega_s - p\omega)\Psi_{r1} - R_R I_{r2}. \quad (16)$$

де Ψ_{i1} , Ψ_{s2} , Ψ_{r1} , Ψ_{r2} , U_{s1} , U_{s2} – відповідно проекції векторів потоків статора і ротора та напруги живлення на осі координат; ω_s – кутова частота напруги живлення статора ТАД при $p = 1$; ω – кутова швидкість ротора; I_{s1} , I_{s2} , I_{r1} , I_{r2} – відповідно проекції векторів струмів обмоток статора і ротора; R_S , R_R – активні опори обмоток статора і ротора.

Рівняння для визначення електромагнітного моменту [7]:

$$M = \frac{3}{2} p \frac{k_R}{\sigma L_S} (\Psi_{r1}\Psi_{s2} - \Psi_{s1}\Psi_{r2}). \quad (17)$$

Швидкість V_t дизель-поїзда визначається по кутовій швидкості небуксуючого ТАД.

За відсутності буксування швидкість руху пропорційна кутовій швидкості обертання ротора двигуна ω . Рівняння руху має вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J_T} (M_T - M_o) \quad (18)$$

де M_T – тяговий момент дизель-поїзда; J_T – момент інерції дизель-поїзда; M_o – момент опору руху; $J_T = mR_K^2$; m – маса дизель-поїзда; R_K – радіус колеса.

Тяговий момент дизель-поїзда (утворюють чотири двигуни ТАД):

$$M_T = 4 M_{\partial} i, \quad (19)$$

де i – передавальне число редуктора.

Момент опору руху визначається згідно правил тягових розрахунків:

$$M_o = R_K W_0 G_H = 9.8 R_K (1.1 + 0.12V)m, \quad (20)$$

де R_K – радіус колеса за колом кочення; W_0 – узагальнений коефіцієнт для відповідного типу поїзда згідно тягових розрахунків; G_H – вага поїзда (Т); V – швидкість поїзда (км/год).

Швидкість дизель-поїзда:

$$V = 3,6 R_K \omega_K, \quad (21)$$

де ω_K – кутова частота обертання колеса (1/с).

Оскільки тяговий момент формується на виході редуктора то і швидкість (електрична) обертання ротора ω_p в математичній моделі визначається в залежності від передатного числа редуктора.

В результаті рівняння руху має вигляд:

$$\frac{d\omega_K}{dt} = \frac{p^* i}{J_T} (4^* M_{\partial}^* i - M_o), \quad (22)$$

Адекватність моделі перевірялась на предмет відповідності експериментальних даних з даними, що отримані в процесі моделювання.

Вихідні дані визначення швидкості руху дизель-поїзда:

Склад дизель-поїзда: головних вагонів – 2; причіпних вагонів – 1. Діаметр колеса по колу кочення – 950 мм. Передатне відношення тягового редуктора (i) – 3.69. Маса порожнього спорядженого вагона: головного дизельного – 70130 кг; причіпного – 40000 кг.

Маса головного вантаженого вагона: при розрахунковому завантаженні – 76030 кг; при номінальному завантаженні – 80000 кг; при максимальному завантаженні – 82000 кг. Маса причіпного вантаженого вагона: при розрахунковому завантаженні – 54250 кг; при номінальному завантаженні – 59530 кг; при максимальному завантаженні – 63520 кг.

В табл. 1 наведено розрахункові значення параметрів моделі згідно вихідних даних.

Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів моделі

Показники	Завантаження:		
	розрахункове	номінальне	максимальне
Маса, m (кг)	260560,0	279060,0	291040,0
Момент інерції, J (кг ²)	58789,0	62956,0	65659,0
Загальний коефіцієнт, p / J	0,000051	0,000048	0,000046
Момент опору руху, M_o (Нм)	1334,2+24,9 ω_K	1428,9+26,8 ω_K	1490,0+27,9 ω_K

Дослідження проводились за наступних умов:
Завдання напруги живлення ТАД та її частоти – згідно закону керування $U/f = \text{const}$. При цьому частота напруги живлення ω_s формувалась як $\omega_s = \omega_k + \Delta S$, ω_k – кругова швидкість колеса колісної пари локомотива; ΔS – величина ковзання час-

тоти напруги живлення ТАД, що визначається різницею між частотою ω_s та електрично круговою частотою обертання ротора ТАД ω_k .

В табл. 2 наведено результати досліджень за умови: час розгону дизель-поїзда – 60 (сек); $\Delta S = 12 / \Delta S = 18$ (1/с); $U/f=14$ (В/Гц).

Таблиця 2 – Результати моделювання за певних умов

Навантаження	p / J	M_d Нм	V , км/год	S , м	a , м/с ²
Розрахункове	0.000051	2930,0/3550,0	53,18/66,0	407,1/514,6	0,23/0,29
Номінальне	0.000048	2920,0/3561,0	49,89/62,23	379,4/480,4	0,21/0,27
Максимальне	0.000046	2910,0/3550,0	47,68/59,52	360,8/457,5	0,20/0,25

Згідно результатів, що приведені в табл. 2 за різних умов процесу розгону при відповідних навантаженнях, дані, які отримані на моделі, відповідають експериментальним значенням.

Моделі для дослідження процесів, що пов'язані з буксуванням, розглядалися в двох варіантах: безпосередньо через дискретну зміну електромагнітного моменту ТАД на певну величину з використанням і без використання ГKM і зміна електромагнітного моменту при використанні ГKM в процесі буксування в залежності від впливу $M_{зч}$ – моменту зчеплення колісної пари з рейками шляхом використання специфіки функціонування ТАД при зміні частоти ковзання.

На рис. 4 приведено характер процесів електромагнітного моменту ТАД M_n (а – без ГKM, б – з ГKM) за умови його дискретної зміни на десятій секунді розгону дизель-поїзда як $M_n = 0.2 M_d$. Процес розгону відбувався в замкнутій системі керування, де

частота напруги живлення визначалась згідно співвідношення $\omega_s = \omega_k + \Delta S$. При цьому $\Delta S = 12$ (1/с). Рис. 4(б) характеризує характер перехідного процесу електромеханічної системи за умови використання ГKM з відповідними конструктивними параметрами В і С. В зоні пуску ГKM приводить до появи небажаних коливань амплітудою до $1.5 M_n$, що може приводити до появи процесу буксування. В зоні дискретної зміни M_d на заданій десятій секунді ГKM приводить до позитивного результату: електромагнітний момент стає меншим до значення $0.5 M_n$, що запобігає виникненню буксування; процес носить коливальний характер, який має плавний, а не ударний характер (негативно діє на механічну частину (редуктор) електроприводу); можливо задовольняти якісні показники перехідного процесу за допомогою вибору конструктивних параметрів ГKM.

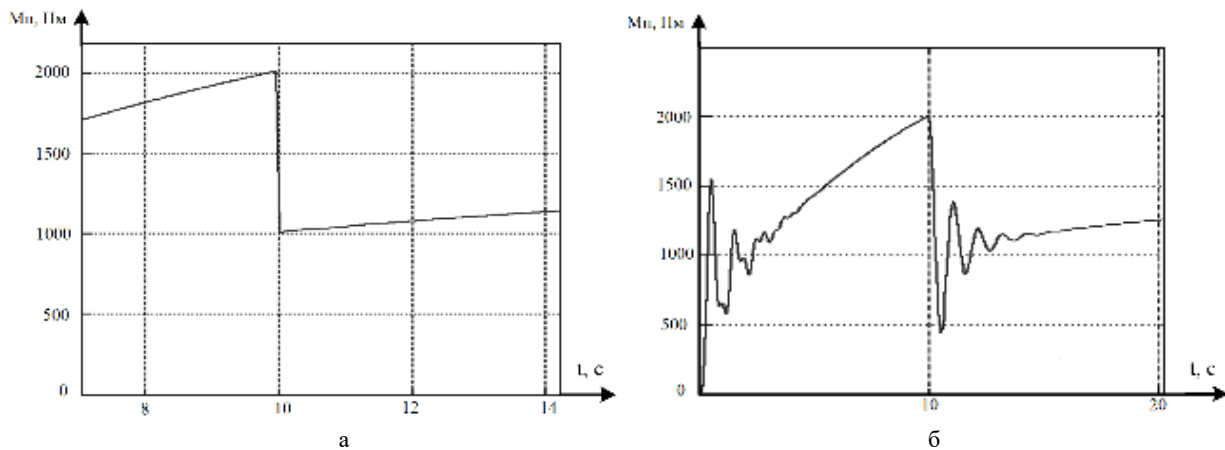


Рис. 4. Графіки зміни електромагнітного моменту ТАД

В табл. 2 приведено результати впливу конструктивних параметрів ГKM В і С в процесі досліджень за умови: час розгону дизель - поїзда – 60 (сек); $p / J = 0.000051$; $\Delta S = 12$ (1/сек); $\Delta S = 18$ (1/сек); $U/f=14$ (В/Гц).

Показники в табл. 4 M_1 , M_2 , M_3 відповідають значенням електромагнітного моменту ТАД (рис. 4, б) з ГKM в процесі розгону дизель-поїзда за умови

виникнення буксування колісної пари при різних значеннях електричних параметрів моделі муфти (В і С), напруги та частоти живлення ТАД, рівня завантаженості. Приведено відповідні якісні показники. Значення M_d відповідає процесу, що встановився.

Дані таблиці показують міру впливу на якісні показники сумісного процесу – параметрів ГKM і процесу буксування колісної пари ТАД.

Таблиця 2 – Результати дослідження

B	C	V, км/г	n	t _p , с	M ₁ , Нм	M ₂ , Нм	M ₃ , Нм	M ₄ , Нм
$\Delta S = 18$ (1/с)								
1.2	9.86	55.21	8	10	3103	-720	1360	695
1.6	9.86	55.12	6	8	3100	-455	1103	696
2.0	9.86	55.02	4	4	3092	-235	930	697
2.2	9.86	54.98	4	3	3090	-138	865	698
2.3	9.86	54.95	3	2.6	3089	-92	839	698
2.4	9.86	54.93	3	2.5	3087	-50	813	697
2.6	9.86	54.86	3	2.5	3086	33	771	697
2.2	39.44	55.38	9	5	3110	-795	1440	697
3.0	39.44	55.34	6	4	3108	-500	1157	697
5.0	39.44	55.22	3	2.5	3100	0	788	697
$\Delta S = 12$ (1/сек)								
3.0	39.44	44.24	6	4	2516	-423	935	570
4.0	39.44	44.19	4	3	2512	-192	750	570
5.0	39.44	44.13	3	2.5	2510	0	638	570

З даних досліджень виходить, що кращими результатами є такі: при формуванні частоти живлення ТАД з $\Delta S = 12$ (1/с) та $\Delta S = 18$ (1/с) – це значення $b=5.0$; $C=39.44$ ($\omega = 6.28$). Аналогічні дослідження проведено і для інших умов (рівня завантаженості, значення ΔS , моменту появи процесу буксування).

На рис. 5 приведено характер процесів електромагнітного моменту ТАД (рис. 5б)) в процесі буксування і без в залежності від впливу моменту зчеплення колісної пари з рейками (Мзч) шляхом використання специфіки функціонування ТАД при зміні частоти ковзання (рис. 5, а) за допомогою складової ($\omega_s - p\omega$) рівнянь (15) і (16).

В результаті зміни цієї складової згідно обраного закону є змога отримувати значення тягового

моменту, характерного для певного типу, який виникає в процесі буксування.

Як правило, у відомих моделях, момент інерції J_M колісної пари, що буксує, визначається у вигляді деякої константи і приймається рівним моменту інерції колісної пари.

Однак, це вірно тільки при повній втраті зчеплення колісної пари з рейкою. Якщо зчеплення $\psi_0 \neq 0$, то при утворенні моменту інерції J_M повинна враховуватися складова, яка залежить від маси поїзда, як і для випадку за відсутності буксування.

В моделі, що пропонується, цей процес враховується шляхом використання аперіодичної функції першого порядку вигляду $W(p) = \frac{1}{Tp+1}$, на вхід якої надходить сигнал ΔS_1 .

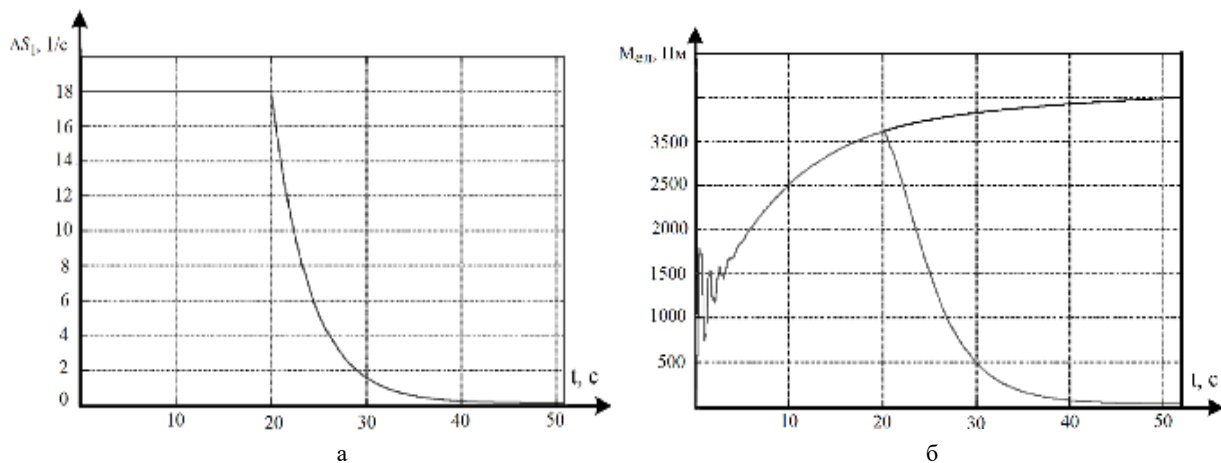
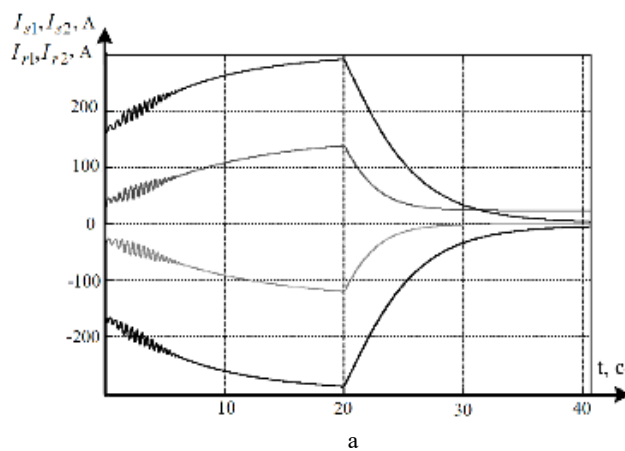


Рис. 5. Графіки зміни електромагнітного моменту ТАД

Згідно з цим формується співвідношення $\omega_{k1} = \omega_1 + \Delta S_1$ (зкореговане значення зворотного зв'язку кутової частоти обертання ротора буксуючого ТАД ω_1 ; ΔS_1 – складова, яка визначає темп зміни ω_{k1} , амплітудне значення якої в моделі обмежується заданою величиною ковзання ΔS). Це дозволяє формувати значення ковзання ΔS , яке використовується в математичній моделі ТАД в синхронній системі координат, в діапазоні від заданого до нульового.

В результаті отримуємо відповідну зміну електромагнітного моменту (рис. 5, б).

За допомогою постійної T передавальної функції можна задавати час протікання процесу буксування колісної пари дизель-поїзда в процесі моделювання.



На рис. 5, б наведено процес зміни електромагнітного моменту в процесі буксування при $T = 4$ с, який характерний при зчепленні колісної пари з рейками за умови $\psi_0 \neq 0$ відповідно до експоненційного закону. Шляхом вибору інших типів передавальних функцій можна отримувати перехідні процеси, тобто характер зміни електромагнітного моменту і в кінцевому випадку – значення швидкості дизель-поїзда.

На рис. 6 приведено графіки зміни фазного струму ТАД:

а – проекції векторів струмів статора і ротора на відповідні вісі координат;

б – фазний струм статора, що відповідають процесу формування тягового моменту при моделюванні згідно запропонованого підходу визначення та використання сигналу ковзання ΔS_1 зворотного зв'язку моделі ТАД.

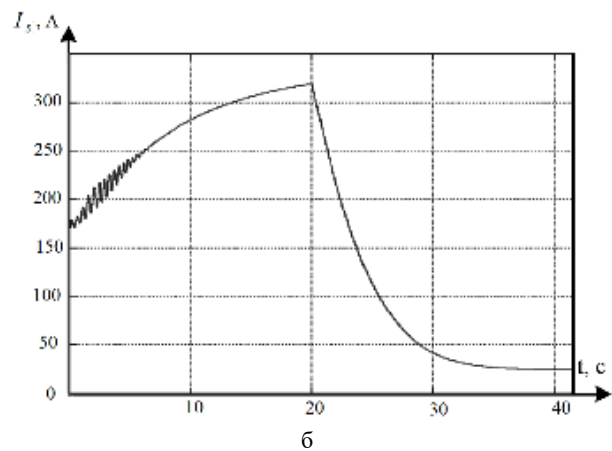


Рис. 6. Графіки зміни фазних струмів ТАД

Використовуючи дану модель є змога крім визначення електричних параметрів ГKM проводити дослідження в плані розроблення комп'ютерних компонентів для систем керування, що забезпечують ефективність функціонування електроприводу з ГKM в процесі буксування. Це в першу чергу використання можливості формування частоти ковзання відповідно до специфіки функціонування ТАД в моменти виникнення буксування, на основі інформації про характер зміни фазного струму ТАД – за значенням його похідної.

Висновки

1. Проведено аналіз математичних моделей електроприводу з ТАД з метою розроблення комп'ютерних компонентів для системи управління тяговим електроприводом за умови використання гумо-кордової муфти і можливих процесів буксування колісних пар дизель-поїзда з урахуванням ступеня завантаженості в процесі його розгону.

2. На основі аналітичного огляду систем автоматичного керування електропередачі дизель-поїзда з тяговим електроприводом змінного струму запропоновані математичні моделі електромеханічної системи дизель-поїзда з урахуванням пружних зв'язків за умови забезпечення якісних показників системи керування у його елементах в процесі

буксування та моделі, що описує можливий процес буксування.

3. Розроблені моделі дозволяють виконувати розрахунки електричних параметрів муфти з еластичними елементами та проводити дослідження на стадії проектування при синтезі системи регулювання тяговим електроприводом з використанням в процесі моделювання пакету MATLAB.

4. Приведені моделі електромеханічної системи дизель-поїзда з урахуванням зчеплення колісних пар з рейками та дисипативних сил ГKM можуть бути використані для дослідження системи автоматичного регулювання (САР) електропередачі та уточнення її параметрів, а також виконання коригування алгоритмів комп'ютерних компонентів САР, отриманих у результаті синтезу системи керування з урахуванням запобігання можливих процесів буксування.

5. На підставі проведених досліджень, як у статичних так і в динамічних режимах, за різних умов розгону дизель-поїзда встановлено, що розроблена модель з урахуванням запропонованого способу моделювання процесів буксування адекватно відображає процеси, що відбуваються в електромеханічній системі дизель-поїзда і може бути використана для розробки комп'ютерних компонентів для системи управління, що забезпечує режим ведення поїзда з

урахуванням умов зчеплення колісних пар з рейками.

6. Запропоновано моделювання ГKM при дослідженні процесів, що зв'язані з буксуванням, як двох масової системи, у вигляді лінійного диференційного рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами. Таке представлення математичної моделі дозволяє проводити дослідження в певному спектрі можливих змін особистих частот (періоду коливань) та швидкості їх затухання, що дає можливість в певному сенсі визначати електричні параметри ГKM.

7. Запропоновані моделі для дослідження процесів, що пов'язані з буксуванням, представлені в двох варіантах: безпосередньо через дискретну зміну електромагнітного моменту ТАД на певну величину з використанням і без використання ГKM і зміна електромагнітного моменту при використанні ГKM в залежності від впливу моменту зчеплення колісної пари з рейками шляхом використання специфіки функціонування ТАД – зміною частоти ковзання згідно заданого закону.

8. Проведено дослідження запропонованої моделі як з точки зору її адекватності, так і її можли-

вості застосування для цілей розроблення комп'ютерних компонентів для системи керування, що забезпечує ефективність функціонування електроприводу з ГKM в процесі буксування.

Результати досліджень надано у вигляді графіків процесів характерних фазових змінних та таблиць, в яких наведені числові значення характерних змінних системи керування в залежності від сигналів управління.

9. Використання сукупності розроблених моделей можливо як для визначення електричних параметрів ГKM, так і проведення досліджень в плані розроблення систем керування, що забезпечують ефективність функціонування електроприводу з ГKM в процесі буксування, використовуючи можливість формування частоти ковзання на основі показників зміни фазного струму ТАД.

10. Розроблені математичні і машинні моделі, за допомогою яких проведені дослідження з метою синтезу регуляторів і визначення значень їх параметрів, показали перспективність такого підходу при проектуванні сучасних систем керування електроприводами дизель-поїздів з тяговими асинхронними двигунами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Walrave, Ellwanger G. Hochgeschwindigkeitsverkehr in Europa // ETR – Eisenbahntechnische Rundschau. – 1995. – №10. – P. 136 – 142.
2. Shabana, A. A., Zaaza, K. E., & Sugiyama, H. (2017). Railway Vehicle Dynamics: A Computational Approach. CRC Press. Amazon.
3. Iwnicki, S. (Ed.). (2006). Handbook of Railway Vehicle Dynamics. CRC Press. CRC Press.
4. Olofsson, U., & Lewis, R. (2006). Adhesion in the Wheel-Rail Contact. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 220(4), 437–446. ResearchGate.
1. 5 Spiriyagin, M., Cole, C., & Sun, Y. (2014). Factors Affecting Wheel-Rail Adhesion. Wear, 314(1-2), 124–129. ScienceDirect.
5. Поповіч М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М.Г. Поповіч, О.Ю. Лозинський. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
6. Толочко, О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О.І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
7. 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.
8. М.Й. Заполовський, М.В. Мезенцев, В.В. Скороделов. Математична модель для синтезу управлінь електроприводом змінного струму // Системи управління, навігації та зв'язку. – Випуск 5(57). Полтава. 2019. Стр. 16-21.

Received (Надійшла) 25.12.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.02.2025

Modeling of the traction electric drive of a diesel train taking into account the use of a rubber-cord coupling during wheelset slippage

M. Zapolovskyi, M. Mezentsev, M. Olifir

Abstract. The issues of development and research of models for the AC electric drive of a diesel train are considered. A review of literary sources on the specified topic and an analysis of existing approaches to solving problems related to the development of control systems that ensure increased efficiency of the electric drive under operating conditions, including possible wheelset slippage, are conducted. Both generally accepted approaches to studying the processes of wheelset slippage through modeling and proposed approaches are examined. Computer components of the electromechanical system of the diesel train have been developed, taking into account elastic connections under the condition of ensuring quality indicators of the control system in its elements during slippage, as well as a model describing the possible slippage process. The presented models can be used to study the automatic regulation system of the electric transmission and to clarify its parameters, as well as to determine the parameters of the rubber-cord coupling (RCC) and subsequently implement them in the form of corresponding computer components of the diesel train control system. The proposed model has been investigated both in terms of its adequacy and its applicability for the development of a control system that ensures the efficiency of the electric drive with RCC during slippage. The research results are presented in the form of graphs of processes of characteristic phase variables and tables containing numerical values of characteristic variables of the control system depending on control signals.

Keywords: computer components, modeling of slippage processes, AC electric drive, diesel train, control systems, slippage, elastic connections, rubber-cord coupling, adequacy, slip frequency, process graphs, tables, control signals.