

УДК:65.011.56

СИТНІК Б. Т., кандидат технічних наук, доцент кафедри «Інформаційні технології»;
БРИКСІН В. О., кандидат технічних наук, доцент кафедри «Інформаційні технології»;
ДАВИДОВ І. В., аспірант кафедри «Інформаційні технології»
(Український державний університет залізничного транспорту)

Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду

Частина 2. Аналіз способів управління швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного та змінного струму

Надано аналіз існуючих способів формування сигналів керування швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного або змінного струму, запропоновано структурну схему моделі електропередачі поїзда та її окремих блоків, наведено спрощену структурну схему моделі системи управління електропередачею постійного струму за заданим поточним графіком руху, запропоновано настройку системи керування швидкістю корегувати на підставі критерію гарантованого ступеня стійкості (КГСС) для забезпечення якості динамічних характеристик у перехідних режимах, сформульовано основні вимоги до моделі адаптивної системи автоматичного керування поїздом з нечітким завданням швидкості руху і її автоматичною корекцією на ділянках проїзду.

Ключові слова: модель, адаптивна система, графік руху, високошвидкісний поїзд, адаптивна корекція швидкості, фактичні параметри проїзду.

Вступ

Об'єктом дослідження і проектування є адаптивні системи автоматичного керування рейковим високошвидкісним транспортом.

Зараз на залізницях України експлуатуються електропоїзди двох систем електричної тяги постійного струму з номінальною напругою в контактній мережі 3000 В і змінного струму з номінальною напругою 25 кВ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основні технічні дані електропоїздів, що зараз експлуатуються, наведені у [2, 3]. Більшість з них – це електропоїзди виробництва Ризького електромашинобудівного заводу (РЕЗ) постійного струму ЕР2 та ЕР2Т і електропоїзди змінного струму ЕР9 різних модифікацій. З 2001 року в Україні у ХК «Луганськтепловоз» було розпочато виробництво вітчизняних електропоїздів постійного ЕПЛ2Т та

змінного ЕПЛ9Т струму, прототипами яких відповідно є модифікації електропоїздів ЕР2Т та ЕР9Т [3, 10].

Першим з високошвидкісних електропоїздів був електропоїзд постійного струму напругою 3000 В з електродвигунами постійного струму послідовного збудження ЕР200 для міжміських перевезень зі швидкістю 200 км/год виробництва РЕЗ. На електропоїзді було передбачено систему ведення поїзда як машиністом, так і автомашиністом [2, 3]. Останніми роками проводяться інтенсивні роботи зі створення швидкісних та високошвидкісних електропоїздів з урахуванням забезпечення вимог євростандарту залізниць за технічним рівнем, показниками безпеки руху, екологічними нормами, рівнем сервісу та економічності перевезення пасажирів. Завдяки впровадженню нових технічних рішень очікується отримати такі техніко-економічні переваги [28]:

- підвищення тягово-енергетичних показників (зменшення споживання електроенергії на 25–30 %, експлуатаційних витрат на планові та позапланові ремонти на 30–40 %);

© Б. Т. Ситнік, В. О. Бриксін, І. В. Давидов, 2022

– збільшення міжремонтних пробігів та можливість переходу на нову систему з ремонту й обслуговування за технічним станом;

– зменшення капітальних та експлуатаційних витрат.

На дослідному електропоїзді ЕД6-0001 [28] використано асинхронні тягові двигуни з короткозамкненим ротором. Для управління двигунами використовуються напівпровідникові перетворювачі на IGBT-транзисторах фірми «Хітачі» (Японія). Бортова автоматизована система управління постійно контролює стан усіх систем електропоїзда, а в аварійних ситуаціях – самостійно змінює алгоритм у мікропроцесорній системі управління тяговими приводами та допоміжним обладнанням. Як приклад, у [9] розглянуто представлений найбільшим світовим виробником залізничного складу – компанією Bombardier Transportation – на конгресі Eurail Speed 2005 і виставці в Мілані проєкт перспективного високошвидкісного поїзда Zefiro з розподіленою тягою, розрахованого на максимальну швидкість 350 км/год.

Проведений аналіз показав, що основними недоліками існуючих систем реалізації автоматичного керування високошвидкісними поїздами в Україні є:

- відсутність комп'ютерних нечітких моделей та систем автоматичного задання графіка швидкості руху, прогнозування та адаптивної корекції швидкості руху поїздів за фактичними параметрами проїзду;

- відсутність автоматичної корекції параметрів настройки регуляторів у контурах керування рухом поїздів при зміні параметрів об'єктів і перешкод (маси m , величини радіусів прохідних кривих r ; підйомів/ухилів j (профіль колії), поточні зміни співвідношень корисних сигналів до перешкод у відповідних ланцюгах регуляторів);

- значна залежність і зниження ефективності керування від суб'єктивних і обмежених фізіологічними характеристиками якостей машиністів і диспетчерів при зростанні швидкості руху і зміні поточних ситуацій.

Визначення мети та завдання дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності високошвидкісних пасажирських перевезень шляхом удосконалення процесу організації адаптивних систем автоматичного керування рухом поїздів.

Постановка завдання синтезу адаптивної системи автоматичного керування рухом високошвидкісних поїздів. Для досягнення мети необхідним є вирішення таких завдань: аналіз існуючих способів формування сигналів керування швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного або змінного струму, створення структурної схеми моделі електропередачі поїзда та її окремих блоків, створення структурної схеми моделі системи

управління електропередачею постійного струму за заданим поточним графіком руху, корегування настройки системи керування швидкістю на підставі КГСС [16, 17, 19, 24–32] для забезпечення якості динамічних характеристик у перехідних режимах, формулювання основних вимог до моделі адаптивної системи автоматичного керування поїздом з нечітким заданням швидкості руху і її автоматичною корекцією на ділянках проїзду.

Основна частина дослідження

Тягові двигуни електропередач поїздів використовуються як змінного, так і постійного струму.

При розгляді поїзда як об'єкт управління можна виділити основні діючі моменти: момент тяги складу M_T і момент навантаження M_H [2–6, 11–15]. Таким чином, вузол визначення обертів двигуна n має складатися з моделі тягового моменту та моделі моменту навантаження.

Оскільки момент тяги складу M_T дорівнює сумі моментів тяги кожного двигуна з урахуванням передавального числа тягового редуктора μ , то визначення тягового моменту M_T складу [14] можна виконати за структурною схемою, яка подана на рис. 1.

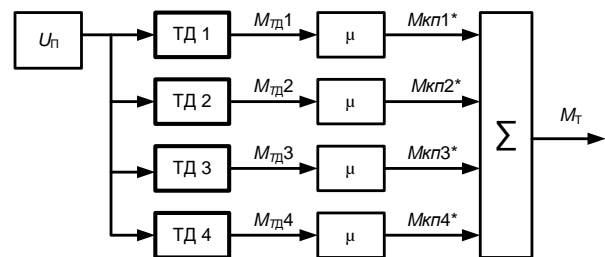


Рис. 1. Структурна схема комп'ютерної моделі тягового моменту

Якщо припустити, що всі двигуни ідентичні та відсутнє боксування колісних пар, то тяговий момент з урахуванням рис. 1 можна визначити так:

$$M_T = 4(K_G + K_M)M_{кп} = 4(K_G + K_M)\mu M_{тд} = 4(K_G + K_M)\mu C_M \Phi_d i_a, \quad (1)$$

$$M_{тд} = C_M \Phi_d i_a, \quad (2)$$

де K_G і K_M – кількість головних та моторних вагонів відповідно. Для поїзда ЕР2 $K_G=2$, $K_M=3$.

Отже, тяговий момент колісної пари $M_{кп}$ множиться на коефіцієнт, що змінюється, наприклад, від 4 (для поїзда ЕР2 і ЕПЛ2Т $M_T=4*M_{кп}$) до 48 (для поїзда ЕР200 $M_T=48*M_{кп}$). Для збільшення тягового

моменту $M_{кл} = \mu * M_{тд}$ використовується редуктор з передавальним числом μ , водночас відбувається збільшення результуючого моменту M_t у μ разів, але за такої умови зменшується швидкість обертання колісних пар у μ разів.

Системи автоматичного управління в більшості випадків є складними пристроями, динаміка яких описується сукупністю диференціальних рівнянь. Для отримання цих рівнянь потрібно скласти диференціальне рівняння для кожного елемента системи так, щоб загальна кількість рівнянь була не меншою за кількість незалежних узагальнених координат, які визначають стан системи.

Складемо лінеаризовану механічну модель об'єкта управління – двгуна локомотива.

Математична механічна модель руху двгуна описується рівняннями виду:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_c, \quad (3)$$

де M_d – рухомий момент вала двгуна; M_c – момент опору на валу двгуна; $I = mR_k^2$ – момент інерції рухомих частин, приведений до вала двгуна; m – маса; R_k – радіус колеса; ω – кутова швидкість вала; t – час.

Рівняння (3) справедливе для будь-якого типу двгуна, але конкретний вид залежностей M_d і M_c від різних чинників визначається його типом.

На основі теорії двгунів можна записати аналітичні залежності цих функцій або зобразити їх у вигляді графіків. Величину I вважатимемо постійною.

Рівняння встановленого режиму (рівняння статички).

$$M_{до} = M_{со}. \quad (4)$$

Даємо прирости ΔM_d і ΔM_c моментам M_d і M_c , тоді

$$M_d = M_{до} + \Delta M_d;$$

$$M_c = M_{со} + \Delta M_c.$$

Віднімаючи з рівняння (3) рівняння статички (4), отримаємо рівняння в приростах (відхиленнях).

$$I \frac{\partial \Delta \omega}{\partial t} = \Delta M_d - \Delta M_c. \quad (5)$$

Для лінеаризації цього рівняння скористаємося формулою Тейлора. Визначимо прирости ΔM_d і ΔM_c :

$$\Delta M_c = \frac{\partial M_c}{\partial \omega} \Delta \omega$$

$$\Delta M_d = \frac{\partial M_d}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial M_d}{\partial U} \Delta U,$$

де $\Delta M_d(t)$ і $\Delta M_c(t)$ – складові приростів M_d і M_c ;

$\Delta M_d(t)$ змінюються у часі за заданим регулятором швидкості законом, $\Delta M_c(t)$ змінюються в часі за законом, що залежить від статичних характеристик підведення та відведення енергії й параметрів двгуна.

Сигнал керування ΔU має формуватися [34] регулятором швидкості за допомогою виконавчого механізму, координати якого позначимо як відхилення $\Delta V(t) = V_0(\Delta S(t)) - V(t)$ між поточною $V(t)$ швидкістю від заданої V_0 графіком руху залежно від поточного відхилення $\Delta S(t) = S_k - S(t)$ між заданою довжиною ділянки руху на маршруті S_k та поточним положенням поїзда на цій ділянці $S(t)$

Функція $\Delta U = f(\Delta V, \Delta S)$ визначається як тангенс кута нахилу дотичної кривої $\frac{\partial M_d}{\partial \Delta U}$ у точці, яка відповідає встановленому режиму в робочій точці.

Тоді

$$\Delta M_d = \frac{\partial M_d}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial M_d}{\partial \Delta U} \frac{\partial \Delta U}{\partial \Delta V} \frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta S} \Delta S, \quad (6)$$

де $V = \omega R_k$ – лінійна швидкість руху поїзда; R_k – радіус колеса локомотива.

Отримані вирази підставимо у рівняння (5) у приростах.

$$I \frac{d\Delta \omega}{dt} = \frac{\partial M_d}{\partial \omega} \Delta \omega - \frac{\partial M_c}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial M_d}{\partial \Delta U} \frac{\partial \Delta U}{\partial \Delta V} \frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta S} \Delta S.$$

Після перенесення в ліву частину рівняння членів, які мають ту саму координату відхилення швидкості, отримаємо лінеаризоване рівняння у відхиленнях (приростах), що виражені в абсолютних одиницях:

$$I \frac{\partial \Delta \omega}{\partial t} + \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{\partial M_d}{\partial \omega} \right) \Delta \omega = \frac{\partial M_d}{\partial \Delta U} \frac{\partial \Delta U}{\partial \Delta V} \frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta S} \Delta S. \quad (7)$$

Кожен член рівняння має певну розмірність. Але при моделюванні систем і порівнянні їх між собою краще мати рівняння у відносних одиницях з безрозмірними коефіцієнтами або з коефіцієнтами, які мають розмірність у ступені, що дорівнює порядку похідної, при якій стоїть цей коефіцієнт.

Для приведення рівняння до безрозмірного вигляду у відносних одиницях необхідно:

- усі члени рівняння розділити на деяку постійну (базову) величину, що має розмірність членів цього ступеня. Такою величиною може бути: номінальне значення, наприклад M_n , максимальне значення або деяке початкове значення цієї змінної. У результаті кожен член стане безрозмірним;

- для переходу до відносних одиниць вибрати постійне значення для кожної координати, що входить до рівняння, та до неї віднести її збільшення;

- ввести позначення відносних одиниць та коефіцієнтів рівняння.

$$I \frac{\partial \Delta \omega}{M_n \partial t} + \frac{1}{M_n} \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{\partial M_d}{\partial \omega} \right) \Delta \omega = \frac{\partial M_d}{M_n} \frac{\partial \Delta U}{\partial \Delta U} \frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta V} \frac{\partial \Delta S}{\partial \Delta S} \Delta S.$$

Кожен член рівняння стає безрозмірним.

Для отримання рівняння у відносних одиницях вибираємо для кожної координати кожного збільшення постійні значення: для кутової швидкості приймаємо її номінальне значення ω_n . Кожен член рівняння, в який входить та чи інша змінна, множимо і ділимо на відповідну їй обрану номінальну величину. Після цього рівняння набуває такого вигляду:

$$I \omega_n \frac{\partial \frac{\Delta \omega}{\omega_n}}{M_n \partial t} + \frac{\omega_n}{M_n} \left(\frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{\partial M_d}{\partial \omega} \right) \frac{\Delta \omega}{\omega_n} = \frac{\partial M_d}{M_n} \frac{\partial \Delta U}{\partial \Delta U} \Delta U, \quad (8)$$

$$\Delta U = \frac{\partial \Delta U}{\partial \Delta V} \Delta V, \quad \Delta V = \frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta S} \Delta S.$$

Ураховуючи, що

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\partial \Delta \omega}{\partial t} \quad ; \quad \frac{dM}{d\omega} = \frac{\partial \Delta M}{\partial \Delta \omega},$$

вводимо позначення коефіцієнтів та змінних;

$$X_1 = \frac{\Delta S}{S_n}, \quad X_2 = \frac{\Delta \omega}{\omega_n},$$

$$T_\varphi = I \omega_n, \quad k_s = \frac{\partial M_d}{M_n} \frac{\partial \Delta U}{\partial \Delta U} \frac{\partial \Delta V}{\partial \Delta S},$$

$$\beta = \frac{\partial M_c}{\partial \omega} - \frac{\partial M_d}{\partial \omega} - \text{коефіцієнт самовирівнювання між}$$

статичними характеристиками двигуна.

Чим більший кут β між взаємним розташуванням характеристик відведення та підведення енергії, тим швидше відбувається перехідний процес і раніше – самовирівнювання.

Після чого рівняння (8) набуває вигляду

$$T_\varphi \frac{dX_2(t)}{dt} + \beta X_2(t) = k_s X_1(t). \quad (9)$$

Усі величини, що входять до рівняння (9), за винятком часу t й постійної T_φ , приведені до безрозмірного вигляду.

Більш поширена форма рівняння об'єкта, коли коефіцієнт при змінній X_2 дорівнює одиниці. Розділивши обидві частини рівняння на β , отримаємо

$$T_0 \frac{X_2}{dt} + X_2(t) = k_0 X_1(t),$$

де $T_0 = \frac{T_\varphi}{\beta}$ – постійна часу об'єкта, с; $k_0 = \frac{k_s}{\beta}$ –

статичний коефіцієнт передачі.

Таким чином, сигнал керування ΔU формується регулятором швидкості [34] за допомогою виконавчого механізму (наприклад, напівпровідникового перетворювача), координати якого залежать від відхилення $\Delta V(t) = V_0(\Delta S(t)) - V(t)$ між поточною швидкістю $V(t)$ від заданої V_0 графіком руху. Відхилення $\Delta V(t)$ залежить від поточного відхилення $\Delta S(t) = S_k - S(t)$ між заданою довжиною ділянки руху на маршруті S_k та поточним положенням поїзда на цій ділянці $S(t)$.

Кутова швидкість колісної пари поїзда визначається відповідно до другого закону Ньютона виразом [2–4, 10–18]:

$$J \frac{d\omega_k}{dt} = M_{\text{ТП}} - M_{\text{Н}}. \quad (10)$$

Для визначення змінної ω_k (електричної кутової частоти обертання ротора) перетворимо рівняння (10) до вигляду

$$\frac{d\omega_K}{dt} = \frac{\mu p_{II}}{J} (M_T - M_H), \quad (11)$$

де $J = m R_K^2$; – момент інерції поїзда; g – прискорення вільного падіння; R_K – радіус колеса; $\frac{d\omega_K}{dt}$ – кутове прискорення; ω_K – кутова частота обертання колісних пар; $\omega_K = \omega_P = \omega/\mu * p_{II}$, ω_P – кутова частота обертання редуктора; $\omega_P = \omega_M/\mu$, ω_M – кутова частота електромагнітного моменту; $\omega_M = \omega/p_{II}$; μ – передавальне число редуктора; ω – електрична кутова частота обертання ротора; p_{II} – кількість пар полюсів; $M_{ТП}$ – момент тяги привода (наприклад, $M_{ТП} = 5 * 4 * M_T$ – для поїзда ЕПЛ2Т та $M_{ТП} = 48 * M_T$ – для поїзда ЕР200); M_T – момент тяги двигуна, $M_T = \mu * M_D$, M_D – електромагнітний момент; M_H – момент навантаження.

Електромагнітний момент M_D визначається згідно із (6), що описує динаміку ТД [14].

Момент опору навантаження M_H залежно від частоти у вигляді лінійної залежності визначається згідно з [2, 14] за виразом

$$M_H = j_r \frac{1}{1000} (a_0 + a_1 V + a_2 V^2) m g R_K, \quad (12)$$

де m – маса поїзда; j_r – величина ухилу колії; a_0, a_1, a_2 – постійні коефіцієнти (наприклад: $a_0 = 1,1$; $a_1 = 0,012$; $a_2 = 0,000247$ для 14-вагонного поїзда [2]).

Розглянуті математичні вирази, що описують роботу моделей електроприводів, будуть використовуватися для синтезу адаптивних управлінь.

Для синтезу системи управління рухом поїзда як керуючий вплив можна розглядати силу тяги або тяговий момент, що розвивається електроприводом. Як необхідне управління [34] обрано тяговий момент M_T , виражений як функція шляху S .

Оскільки за другим законом Ньютона

$$m a(t) = m \frac{dV(t)}{dt} = m \frac{d^2 S(t)}{dt^2} = \sum F(t) = F_T(t) - F_H(t)$$

або у зображенні $\sum F(p) = m p^2 S(p)$,

де $M_T(t) = R_K F_T(t)$, $V = \omega_K R_K$ – лінійна швидкість руху поїзда; $\omega_K = 2 \pi n/\mu$ – кутова швидкість колеса,

то

$$M_T(t) = R_K F_T(t) = m R_K \frac{d^2 S(t)}{dt^2} + \left[a_0 + a_1 \frac{dS(t)}{dt} + a_2 \left(\frac{dS(t)}{dt} \right)^2 \right] \frac{j m g R_K}{1000}.$$

У пакеті моделювання неперервних систем розроблена структурна схема моделі, яка використовується для дослідження та уточнення параметрів схеми.

Згідно з [34] математична механічна модель, що описує динаміку руху поїзда, є рівняннями:

$$\frac{dV(t, S_i)}{dt} = K_v (M_T - M_H); \quad (13)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = V(t, S_i), \quad (14)$$

де $V(t, S_i)$ – лінійна швидкість на ділянці S_i ; S_i – координата i – ї ділянки шляху; $K_v = K_1 R_K$;

$$K_1 = \frac{\mu p_{II}}{J}; S - \text{шлях.}$$

Використовуючи вирази (12)–(14), виразимо потрібний тяговий момент M_T як функцію швидкості пройденого шляху на ділянці S_i :

$$\frac{d\omega}{dt} = K_1 (M_T - M_H).$$

Розглянемо математичну модель електричної частини електропривода постійного струму з одним еквівалентним двигуном.

Еквівалентна електрична схема моделі заміщення електродвигуна постійного струму з додатковими резисторами $R_{ш}$ і R_D наведена на рис. 2 [14].

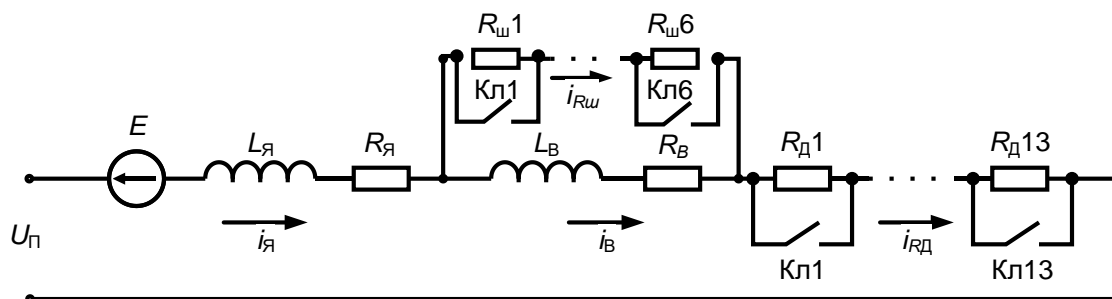


Рис. 2. Еквівалентна електрична схема моделі заміщення електродвигуна постійного струму із додатковими резисторами $R_{ш}$ і $R_{д}$

$$L_{я} \frac{di_{я}}{dt} + R_{я} i_{я} = U_{я};$$

$$L_{в} \frac{di_{в}}{dt} + R_{в} i_{в} = U_{в};$$

або в зображеннях

$$W_{я}(p) = \frac{i_{я}(p)}{U_{я}(p)} = \frac{\frac{1}{R_{я}}}{\frac{L_{я}}{R_{я}} p + 1} = \frac{K_{я}}{T_{я} p + 1};$$

$$W_{в}(p) = \frac{i_{в}(p)}{U_{в}(p)} = \frac{\frac{R_{ш}}{R_{ш} R_{в} + 1}}{\frac{R_{ш}}{R_{ш} R_{в} + 1} L_{в} p + 1} = \frac{K_{вш}}{T_{вш} p + 1}. \quad (15)$$

$$J \frac{dn}{dt} = M_T - M_H; \quad M_T = 4 \mu C_M \Phi_D i_{я};$$

$$E = U_{\Pi} - U_{я} - U_{в} - i_{рд} R_{д};$$

$$E = C_E \Phi_D n; \quad C_E \Phi_D n = U_{\Pi} - U_{я} - U_{в} - i_{рд} R_{д},$$

$$\text{звідки } n = \frac{U_{\Pi} - U_{я} - U_{в} - i_{рд} R_{д}}{C_E \Phi_D}; \quad (16)$$

$$\Phi_D = K' W i_{я},$$

де $L_{я}$, $R_{я}$, $L_{в}$, $R_{в}$ – значення індуктивності та резистора якорного кола та кола збудження відповідно; $i_{я}$, $i_{в}$, $i_{рд}$, $i_{ш}$ – струми кола якоря, збудження, додаткового й шунтуючого резисторів відповідно;

$U_{я}$, $U_{в}$, $U_{ш}$, U_{Π} , E – відповідно падіння напруги в якорному колі, колі збудження та шунтуючого резистора, напруга живлення, електрорушійна сила (ЕРС); $R_{д}$, $R_{ш}$ – опір додаткового й шунтуючого резисторів відповідно; C_E , C_M – постійні величини; Φ_D – магнітний потік двигуна; n – оберти двигуна; $K' = f(W i_{я})$ – нелінійний коефіцієнт апроксимації кривої намагнічування; W – кількість ампер-витків обмоток двигуна; μ – передавальне число редуктора; j – коефіцієнт профілю колії (для горизонтальної ланки $j=1$); a_0 , a_1 , a_2 – постійні коефіцієнти; V – швидкість поїзда; $V = \omega_K R_K$, де $\omega_K = 2\pi n / \mu$ – кутова швидкість колеса.

Нелінійний коефіцієнт апроксимації кривої намагнічування K' є функцією струму та кількості ампер-витків. Магнітний потік Φ_D та струм $i_{я}$ пов'язані кривою намагнічування, яка показана на рис. 3 суцільною лінією. У найпростішому випадку можна подати криву намагнічування прямою лінією з обмеженням, як показано на рис. 3 пунктирною лінією.

Апроксимація кривої намагнічування з використанням експоненціальної кривої показана на рис. 3 штриховою лінією. Якщо знехтувати насиченням магнітної системи двигуна, то можна виразити залежність потоку від струму таким чином: $\Phi_D = \alpha i_{я}$, де $\alpha = \tan \varphi$, φ – кут нахилу дотичної до кривої намагнічування у точці нуля.

Більш точно уявлення отримано в результаті апроксимації кривої намагнічування з використанням експоненціальної кривої, як це показано на рис. 3 точковою лінією. І отже, вираз (16) можна записати як

$$\Phi_D = \gamma W (1 - e^{\beta i_{я}}), \quad (17)$$

де γ , β – коефіцієнти, що визначаються за кривою намагнічування, $\gamma=0,186$, $\beta=-0,012$. За такої умови похибка апроксимації кривої намагнічування становила не більше ніж 0,35 %.

З використанням апроксимації методом найменших квадратів можна апроксимувати цю залежність рядами Тейлора. У цьому випадку вираз (17) можна записати у вигляді

$$\Phi_D = 0.000931 W i_a, \quad (18)$$

де $W=43$, середньоквадратична похибка апроксимації дорівнює $4,3661 \cdot 10^{-6}$, а максимальна – $23,147 \cdot 10^{-3}$.

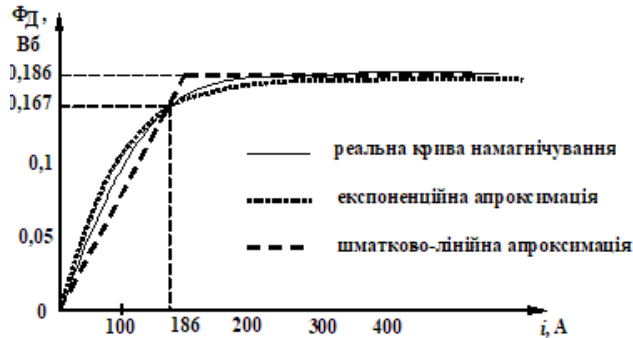


Рис. 3. Апроксимація кривої намагнічування двигуна постійного струму

Момент навантаження визначається співвідношенням [14]:

$$M_H = j_r W_0 F_C R_K;$$

$$W_0 = \frac{1}{1000} (a_0 + a_1 V + a_2 V^2); \quad (19)$$

$$F_C = m g, \quad (20)$$

W_0 – питомий опір руху;

F_C – зчпна вага.

Зчпна вага F_C визначається сумарною масою вагонів та навантаженням їх пасажирів.

Визначення швидкості при розмірності [м/с] здійснюється відповідно до виразу

$$V = \frac{2 \pi n}{\mu} R_k. \quad (21)$$

Для визначення оборотів двигуна n в операторній формі запису у виразі (13) виразимо кутову швидкість ω через n , скориставшись виразами (21) і (15), та, замінивши операцію диференціювання на оператор Лапласа p , отримаємо

$$n = \frac{\mu V}{2 \pi J p} (M_T - M_H). \quad (22)$$

Момент інерції J визначається як

$$J = m R_K^2, \quad (23)$$

де m – маса поїзда.

Таким чином, з урахуванням (21) та (22) отримаємо

$$n = \frac{K_n V}{p} (M_T - M_H), \quad (24)$$

де $K_n = \frac{\mu}{2 \pi J}$; p – оператор Лапласа.

Реалізація комп'ютерної моделі в системі адаптивного управління за співвідношеннями (11)–(13) з використанням пакетів моделювання безперервних систем та перевірка її адекватності наведені у [16, 17, 19, 24–32].

Залежно від типу двигуна існують різні способи управління швидкістю обертання роторів двигунів, отже, і швидкістю поїзда.

Для двигунів постійного струму послідовного і незалежного збудження можливі нижченаведені способи управління швидкістю [4] (рис. 4).

Способи регулювання частоти обертання

Частоту обертання двигуна постійного струму згідно з (16)

$$n = \frac{U - I_a (\sum R_a + R_d)}{C_e \Phi} \quad (25)$$

можна регулювати трьома способами: 1) включенням додаткового реостата R_d в ланцюг обмотки якоря; 2) зміною магнітного потоку Φ ; 3) зміною напруги U .

При включенні реостата в ланцюг якоря частота обертання зі зростанням навантаження зменшується різкіше, ніж під час роботи двигуна без реостата:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{I_a (\sum R_a + R_d)}{C_e \Phi} = n_0 - \Delta n. \quad (26)$$

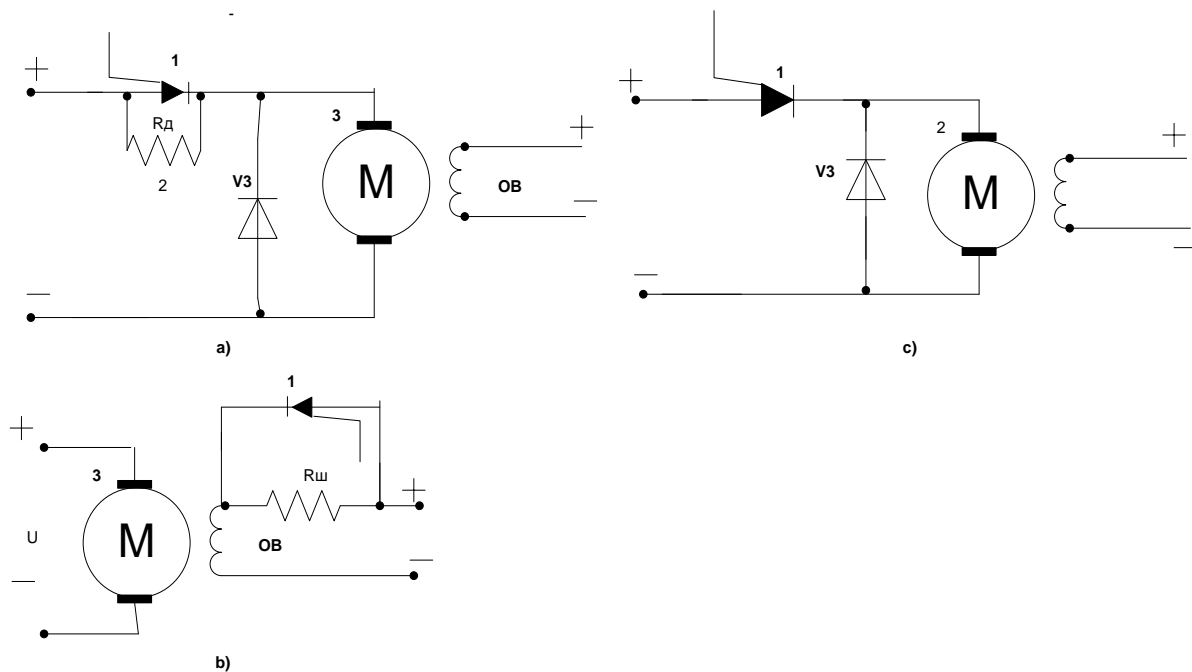


Рис. 4. Способи управління швидкістю обертання роторів двигунів, а отже, і швидкістю поїзда: а – керування за допомогою додаткових резисторів, включених у ланцюг якоря; б – керування зміною струму збудження; с – управління зміною постійної напруги, що підводиться

Способи управління швидкістю електродвигуна можна проаналізувати з огляду на його електромеханічні характеристики.

Управління швидкістю за допомогою додаткових резисторів (реостатний спосіб) є дуже простим за своєю реалізацією способом. Однак він недостатньо економічний через втрати енергії на додатковому резисторі. Незважаючи на це реостатне управління швидкістю через простоту своєї реалізації використовується досить широко. Введення додаткового резистора також застосовується для управління (обмеження зверху) струмом і моментом двигуна в перехідних режимах, у яких струм і момент можуть набувати неприпустимо великих значень. Так, у перший момент пуску двигун перебуває в режимі короткого замикання і струм короткого замикання при його пуску визначається напругою живлення та сумарним опором обмоток якоря та збудження.

У багатьох випадках використовується не один, а кілька додаткових резисторів. Їх кількість залежить від моменту навантаження електропривода та вимог до плавності перехідних процесів.

Для випадку управління швидкістю зміною напруги живлення потрібне кероване деяким перетворювачем джерело постійного струму. Перетворювач характеризується у випадку ЕРС E_{Π} внутрішнім опором – R_{Π} і коефіцієнтом посилення $k_{\Pi} = E_{\Pi} / U_V$, де U_V – вхідний управляючий сигнал. Цей

метод часто використовується в системах зі схемою «генератор – двигун». Основними перевагами таких систем є великий діапазон і плавність управління швидкістю двигуна, висока жорсткість і лінійність характеристик, можливість отримання всіх енергетичних режимів роботи двигуна. Як кероване джерело можуть використовуватися перетворювачі на основі широтно-імпульсного регулювання (ШИР) і широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) при постійному значенні напруги. Цей спосіб управління швидкістю, струмом і моментом електропривода пов'язаний з періодичною імпульсною зміною параметрів будь-яких елементів електричних ланцюгів двигуна (наприклад, додаткового резистора або напруги, що підводиться до двигуна).

Управління швидкістю обертання ротора двигуна зміною струму збудження використовується тоді, коли потрібно розширити межі регулювання за рахунок збільшення кутової швидкості вище основної при навантаженні двигуна номінальним струмом. У цьому разі зміна струму збудження здійснюється шунтуванням обмотки збудження двигуна.

В електроприводах змінного струму, які тепер все більше застосовуються на залізничному транспорті, актуальними є питання, пов'язані з управлінням швидкістю обертання роторів двигунів. Управління зміною змінної напруги, що підводиться, показано на рис. 5.

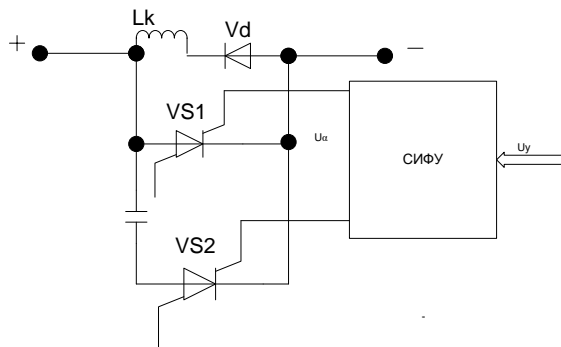


Рис. 5. Управління зміною змінної напруги, що підводиться

З позиції теорії електричних машин та електропривода основним способом керування швидкістю асинхронного двигуна є частотне керування. Тут аналогічно, як і у двигунів постійного струму, управління швидкістю рухомого тягового складу здійснюється зміною частоти обертання роторів короткозамкнутих асинхронних двигунів [2–4, 11, 12].

Принципова можливість управління кутовою швидкістю асинхронного двигуна зміною частоти напруги впливає зі співвідношення

$$\omega = 2f_1(1-s)/p_n, \quad (27)$$

де f_1 – частота напруги живлення; s – частота ковзання двигуна; p_n – кількість пар полюсів асинхронної машини.

При керуванні частотою виникає необхідність керування живильним двигуном напругою U_1 , що впливає з виразу

$$U_1 = k \Phi f_1, \quad (28)$$

де k – коефіцієнт пропорційності; Φ – магнітний потік у електродвигуні.

З формули (28) випливає, що якщо при постійній напрузі U_1 змінювати частоту f_1 , то потік Φ повинен змінюватися пропорційно частоті. При збільшенні частоти f_1 , за тих самих умов, наслідком зменшення потоку Φ є зниження допустимого моменту двигуна. Як випливає з [4], для найкращого використання асинхронного двигуна при управлінні його кутовою швидкістю зміною частоти необхідно одночасно керувати напругою живлення у функції частоти і навантаження.

Для управління швидкістю асинхронних двигунів найбільш часто використовуються транзисторні частотні перетворювачі на базі транзисторів IGBT [4, 11, 12], за допомогою яких реалізовано частотне управління асинхронними двигунами, що полягає у

взаємопов'язаному управлінні частотою f_1 і діючим значенням U_1 основної гармоніки живлення напруги. Закони зміни U_1 і f_1 програмується. Основу перетворювачів становить трифазний автономний інвертор напруги (АІН) із ШІМ [4].

Система управління перетворювача виконана на основі програмованого мікропроцесорного контролера (МПК). В АІН перетворення постійної напруги в трифазну змінну здійснюється в мостовому напівпровідниковому інверторі. Напівпровідникові елементи перемикаються багаторазово протягом періоду коливання вихідного сигналу відповідно до заданого алгоритму МПК. Алгоритм керування підтримує необхідне керування частотою та діючим значенням основної гармоніки вихідної напруги, забезпечуючи при цьому синусоїдальність форми струму навантаження.

Перетворювачі частоти з мікропроцесорною системою управління мають значну кількість програмованих функцій, що автоматично виконуються. Ця обставина має особливо велике значення при створенні систем управління з використанням мікроконтролерів та мікро-ЕОМ для високошвидкісних поїздів з різним типом тягових приводів (постійного та змінного струму). За допомогою мікропроцесорної системи управління забезпечується [4, 11–13, 20–23]:

- частотний пуск з оптимальним за часом розгоном і рекуперативне гальмування двигуна;
- автоматична ідентифікація параметрів двигуна;
- підтримка мінімального струму двигуна із забезпеченням необхідного значення моменту;
- повне управління моментом двигуна у всьому діапазоні частот;
- векторне управління тяговим двигуном;
- ПІД-регулювання керованим параметром (струмом, напругою, потужністю);
- дистанційне оперативне управління перетворювачем частоти і двигуном;
- мережевий обмін даними, що знімаються з первинних датчиків системи управління, з використанням стандартних інтерфейсів та системних шин;
- самодіагностика та діагностика стану перетворювача частоти й тягових двигунів;
- електричний захист перетворювача частоти та керованого двигуна;
- відображення значення основних параметрів на засобах вбудованої індикації.

Цю елементну базу (IGBT-транзистори, програмовані мікропроцесорні контролери) можна ефективно використовувати і для реалізації законів управління електроприводом постійного струму.

Структурна схема електропередач поїзда

Відповідно до схеми силових ланцюгів тягової електропередачі магістрального пасажирського

тепловоза ТЕП-150 та методів імпульсного управління тягою поїзда постійного струму [34] структуру електропередачі подано на рис. 6.

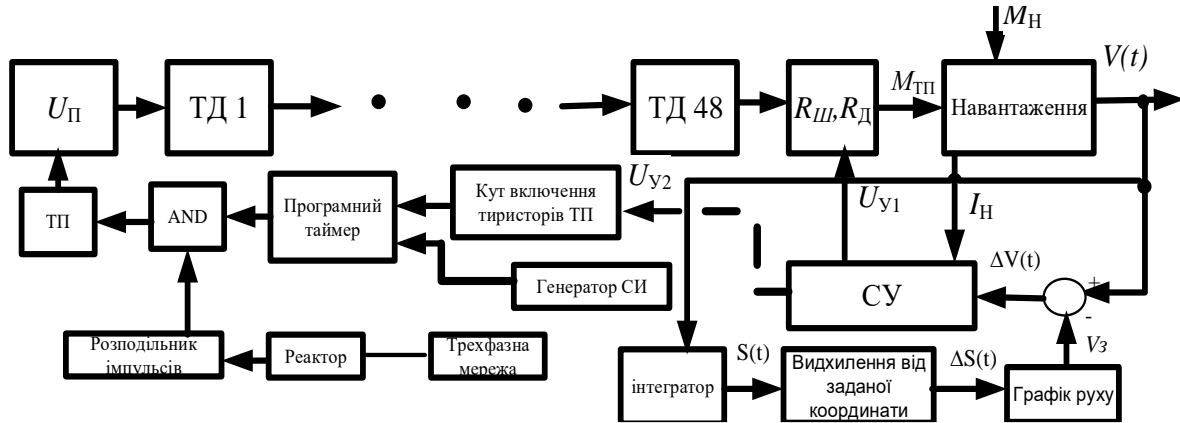


Рис. 6. Структурна схема електропередачі поїзда

Спрощена структурна схема моделі системи управління електропередачею поїзда за заданим поточним графіком руху наведена в [34].

Найбільш доцільно такі дослідження проводити за допомогою математичного моделювання на машинних моделях.

За співвідношенням (15) [14, 15] побудована структурна схема математичної електричної частини моделі визначення струму якоря (рис. 7), а за виразом (24) – структурна схема механічної моделі визначення оборотів n (рис. 8).

Схема моделі на рис. 7 має переважно послідовну структуру. Блок 1 є формувачем напруги живлення. За допомогою блоків 2–5 і блока 10 визначаються падіння напруги на індуктивності обмотки якоря L_A і на індуктивності обмотки збудження L_B . На виходах блоків 6 і 11 формуються сигнали струмів, що протікають через індуктивності L_A і L_B відповідно. Таким чином, блоки 5–7 є моделлю обмотки якоря, а блоки 8–12 – ланцюга збудження. За виразами (15) і (16) за допомогою блоків 13–15 та 17 формується ЕРС двигуна E .

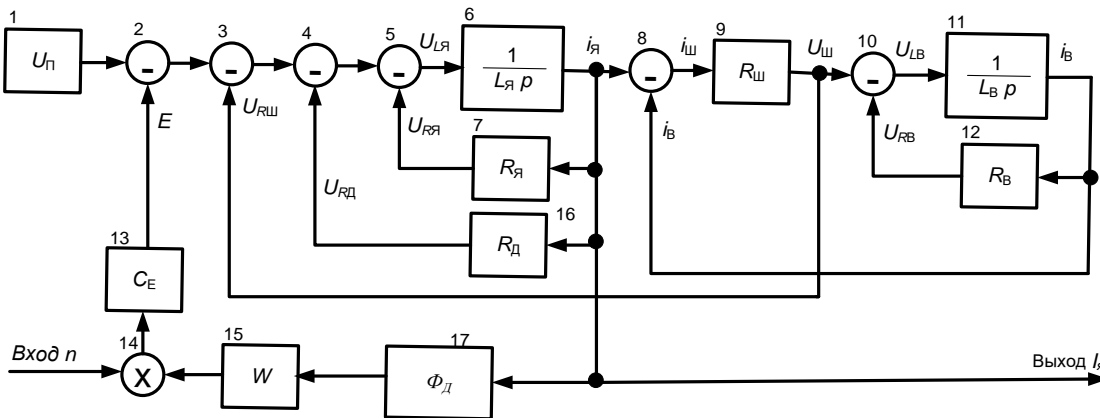


Рис. 7. Структурна схема математичної електричної частини моделі визначення струму якоря

Структурна схема механічної частини моделі визначення оборотів n за виразом (24) подана на рис. 8. На структурній схемі блоки 1–2 виконують обчислення потоку двигуна Φ_d згідно з рівнянням (18), блоки 3 та 4 обчислюють момент двигуна M_d згідно з рівнянням (3), блок 5 – тяговий момент складу згідно з

рівнянням (11), блок 9 – швидкість поїзда V відповідно до рівняння (13). На блоках 9–17 виконано модель навантаження відповідно до рівняння (12). У результаті на виході інтегратора 8 відповідно до рівняння (22) отримуємо обороти двигуна n .

Масу поїзда m , радіус кривої шляху прямовання r та величину ухилу/підйому колії j введено до запропонованої моделі визначення обертів двигуна через блоки множення 15, 16, 18 додатково до відомої схеми моделі [14, 15] для адаптації моделі до зміни цих параметрів при проїзді дільницями прямовання.

Спрощена структурна схема загальної електромеханічної моделі запропонованої системи управління електропередачею постійного струму наведена на рис. 9.

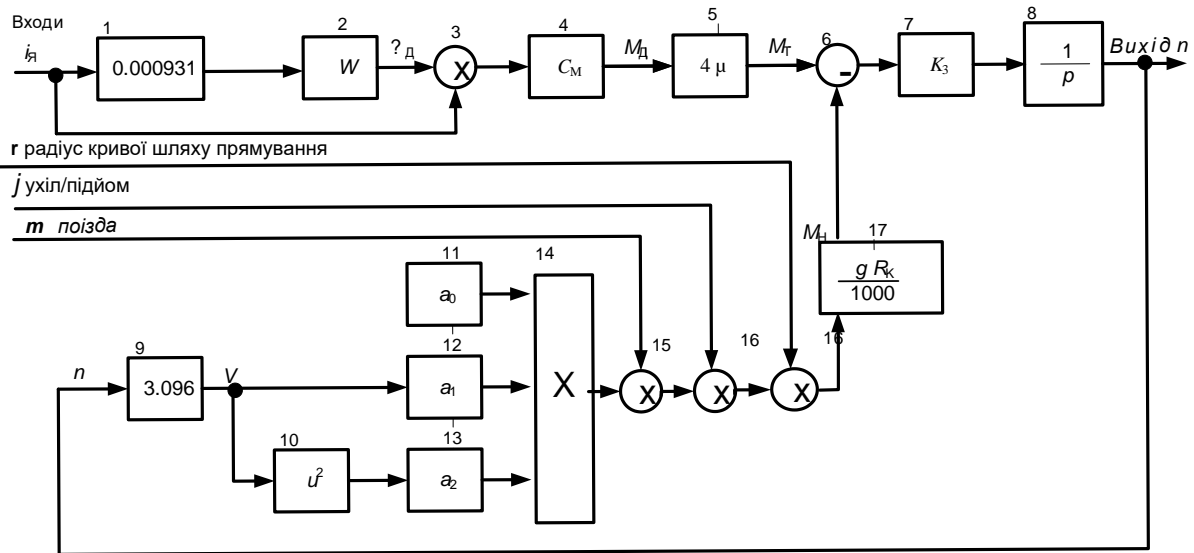


Рис. 8. Структурна схема механічної частини запропонованої моделі визначення обертів двигуна постійного струму

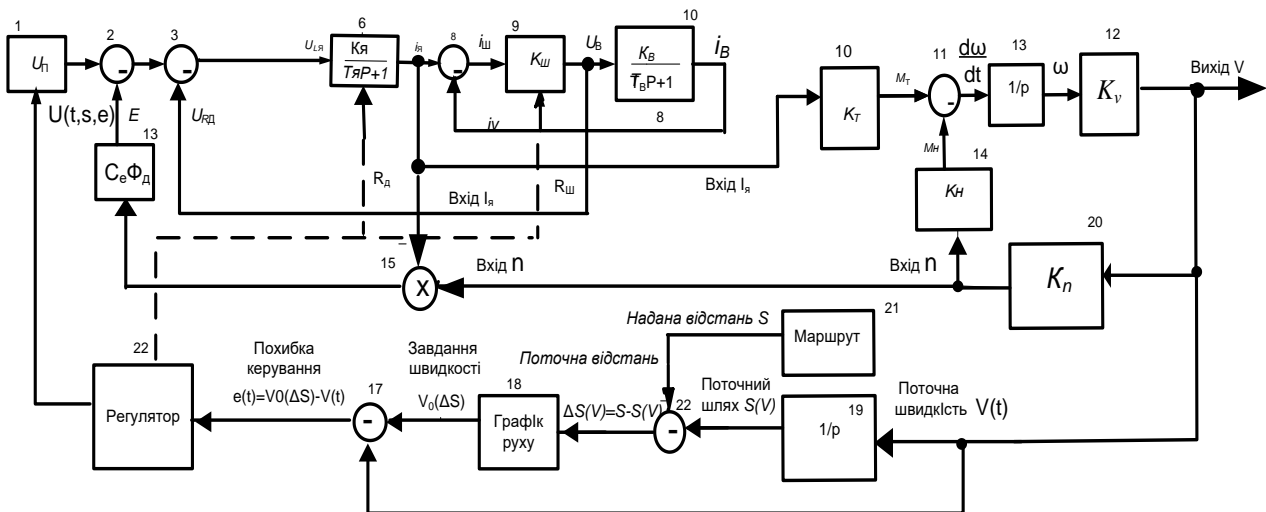


Рис. 9. Спрощена структурна схема загальної електромеханічної моделі системи управління електропередачею постійного струму за заданим поточним графіком руху

Обмотка якоря, що складається з котушки індуктивності $L_я$, додаткового резистора $R_д$ і опору $R_я$, на рис. 9 подана блоком 6 у вигляді аперіодичної ланки з параметрами $K_я$ і $T_я$, які визначаються згідно з

електричними параметрами двигуна: $K_я=1/(R_я + R_д)$, $T_я=L_я/(R_я + R_д)$.

Ланцюг збудження, що складається з котушки індуктивності $L_в$, опору $R_в$ та шунтуючого резистора

R_{III} в математичній моделі поданий у вигляді послідовності блоків: підсилювача (блок 9) з коефіцієнтом посилення $K_{III}=R_{III}$ і аперіодичної ланки (блоки 12, 13) з параметрами K_B і T_B , які визначаються згідно з електричними параметрами двигуна: $K_B=1/R_B$, $T_B=L_B/R_B$ (рис. 9). Пунктирні лінії на виході регулятора 22 – можливі сигнали керування резисторами R_d та R_{III} регулятором в автоматичному

режимі або контролером машиніста у ручному режимі.

Приклад вікна нечіткого задання графіка необхідної швидкості руху рис. 9 (блок 18) поїзда на ділянці прямування наведено на рис. 10. Детальний опис правил побудови нечітких моделей та систем керування, інтеграція окремих пакетів Fuzzy-Logic + Simulink у середовищі моделювання Matlab наведено в [5, 6] і в статті не розглядається.

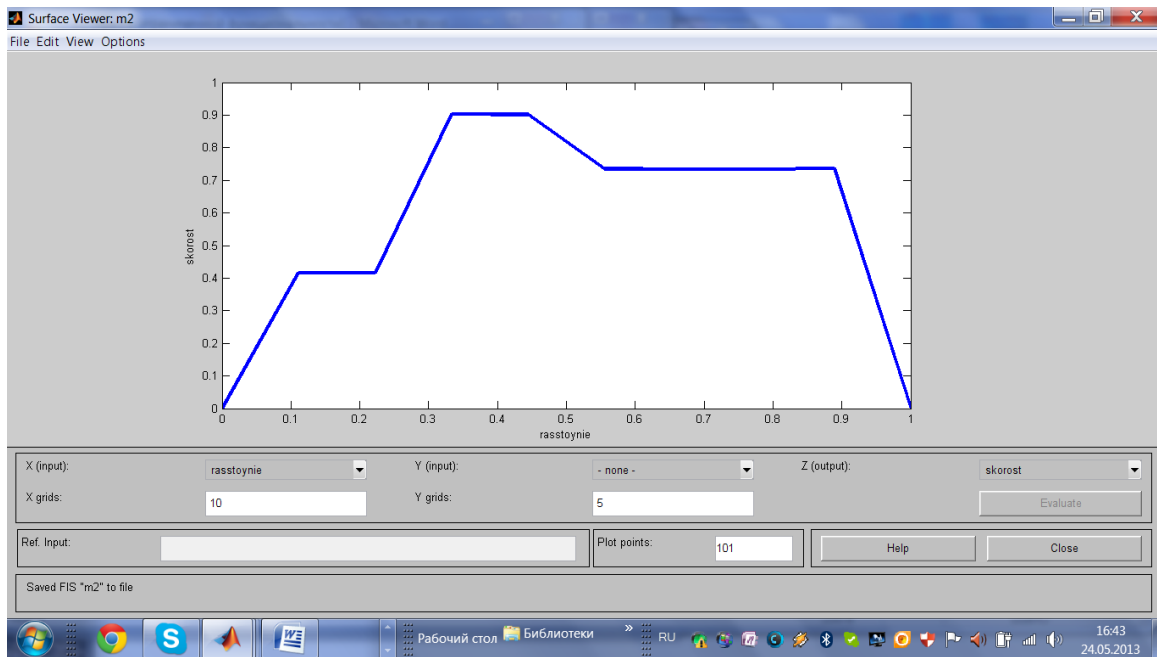


Рис. 10. Вікно перегляду нечіткого графіка руху на ділянці проїзду

Для реалізації цього графіка руху поїзда на ділянці проїзду необхідна корекція відхилень поточної швидкості від заданої графіком на рис. 10 на нижньому рівні управління за допомогою цифрового моделювання нечіткої системи.

Результати моделювання адаптивної системи управління (рис. 9) з нечітким заданням швидкості проїзду (рис. 10) будуть наведені у третій частині статті.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у цьому напрямку

1. Надано аналіз існуючих способів формування сигналів керування швидкістю поїзда з тяговими двигунами постійного або змінного струму.

2. Запропоновано структурну схему моделі електропередачі поїзда та її окремих блоків. Масу поїзда m , радіус кривої шляху прямування r та величину ухилу/підйому колії j введено до запропонованої моделі визначення обертів двигуна додатково до відомої схеми для адаптації моделі до

зміни цих поточних параметрів при проїзді ділянками прямування.

3. Запропоновано спрощену структурну схему моделі системи управління електропередачею постійного струму за заданим поточним графіком руху.

4. Доведено, що сигнал керування ΔU формується [34] регулятором швидкості за допомогою виконавчого механізму, координати якого залежать від відхилення $\Delta V(t) = V_0(\Delta S(t)) - V(t)$ між поточною $V(t)$ швидкістю від заданої V_0 графіком руху залежно від поточного відхилення $\Delta S(t) = S_k - S(t)$ між заданою довжиною ділянки руху на маршруті S_k та поточним положенням поїзда на цій ділянці $S(t)$.

5. Запропоновано [24, 27–29] настройку системи керування швидкістю корегувати на підставі КГСС для забезпечення якості динамічних характеристик в перехідних режимах.

6. Наведено приклад вікна реалізації перегляду нечіткого графіка руху на ділянці проїзду.

Список використаних джерел

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року: [схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України № 430-р від 30 травня 2018 р.]. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennya-nacionalnoyi-transportnoyi-strategiyi-ukrayini-na-period-do-2030-roku>
2. Басов Г. Г., Яцько С. І. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. Харків: Апекс+, 2005. Ч. 2. 248 с.
3. Басов Г. Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України: монографія. Харків: Апекс+, 2004. Ч. 1. 240 с.
4. Алексеев К. Б., Палагута К. А. Микроконтроллерное управление электроприводом. Москва: МГИУ, 2008. 298 с.
5. Regat A. Fuzzy modeling and control. Moscow: Vinom, 2009. 798 p.
6. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. Санкт-Петербург: БХВ – Петербург, 2003. 736 с.
7. Корниенко В. В., Омеляненко В. И. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 159с.
8. Высокоскоростной поезд Zefiro. *Железные дороги мира*. 2006. № 4. С. 17–27. URL: https://zdmira.com/images/pdf/dm2006-04_17-27.pdf
9. Краткий обзор истории европейских высокоскоростных поездов. Ч. 1: К итогам конгресса EurailSpeed 2005. *Железные дороги мира*. URL: <https://zdmira.com/archive/2005/12>.
10. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В. И. Носков, В. Д. Дмитриенко, Н. И. Заполовский, С. Ю. Леонов. Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. 248 с.
11. Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. Москва: Энергия, 1987. 328 с.
12. Ставицкий В. Н. Математическая модель процессов в электротехнической системе «вентильно-трансформаторный инвертор – асинхронный двигатель». *Тр. Донецк. госуд. техн. ун-та*. Донецк: ДонГТУ, 2000. Вып. 16. С. 263–271.
13. Яцько С. І. Задача скорочення витрат електричної енергії на тягу електропоїзда. *Зб. наук. праць*. Харків: УкрДАЗТ, 2003. Вип. 55. С. 26–30.
14. Липчанський М. В. Моделювання, оптимізація та контроль систем керування рухомого складу приміського сполучення: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.07/ Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». Харків, 2008. 20 с. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=REF&P21DBN=&S21FMT=JwU_B&S21ALL=%28<>U%3DO285.202\\$<>%29&Z21ID=&S21SRW=GOD&S21SRD=UP&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=S&I21DBN=REF&P21DBN=&S21FMT=JwU_B&S21ALL=%28<>U%3DO285.202$<>%29&Z21ID=&S21SRW=GOD&S21SRD=UP&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=20)
15. Дмитриенко В. Д., Носков В. И., Липчанский М. В. Математическое моделирование и оптимизация системы управления тяговым электроприводом. *Системы обработки информации*. 2004. Вип. 11 (39). С. 55–62.
16. Загарий Г. И., Шубладзе А. М. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 104 с.
17. Сытник Б. Т., Сытник В. Б. Синтез структуры и моделирование адаптивных цифровых фильтров и систем управления с нестационарными характеристиками. Ч. 1. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2003. № 6. С. 18–24.
18. Быков Ю. М., Василенко В. С. Помехи в системах с вентильными преобразователями. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 152 с.
19. Адаптивный фильтр: пат. 11427 Україна: МПК G01S 13/66 / Загарий Г. І., Ситник Б. Т., Левочко Б. С., Мамонов А. В., Гусев І. В., Гусев П. В., Коновалов В. С., Пороцкий В. Г.; заявник і патентовласник Харк. держ. акад. залізнич. трансп. № 4662779/SU; заявл. 13.03.1989; опубл. 25.12.1996, Бюл. № 4. URL: https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/29144_9/
20. Жусубалиев Ж. Т., Колоколов Ю. В. Бифуркации и хаос в релейных и широтно-импульсных системах автоматического управления. Москва: Машиностроение-1, 2001. 120 с.
21. Заполовський М. Й., Скороделов В. В., Мезенцев М. В. Синтез управлiнь для оптимiзацiї динамiчних процесiв електроприводу змiнного струму. *Системи управлiння, навігацiї та зв'язку: зб. наук. праць* / гол. ред. С. В. Козелков. Полтава: ПНТУ, 2018. Вип. 4 (50). С. 38–41. URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/444749>.
22. Мезенцев М. В., Заполовський М. Й., Липчанський М. В. Розроблення та дослідження системи керування електропередачі дизель-поїзда на основі методів цифрового управління. *Системи управлiння, навігацiї та зв'язку: зб. наук. праць*. Полтава: ПНТУ, 2019. Вип. 2. С. 46–50. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2019_2_12
23. Заполовський М. Й., Мезенцев М. В. Цифрова модель системи керування електроприводу дизель-поїзда. *Системи управлiння, навігацiї та зв'язку: зб. наук. праць*. Полтава: ПНТУ, 2019. Вип. 2 (64). С. 26–30. URL: <http://journals.nupp.edu.ua/sunz/article/view/2301/1775>, doi:10.26906/SUNZ.2021.2.02

24. Реализация нейронечетких моделей и регуляторов гарантированной точности / В. А. Брыксин, В. С. Михайленко, Б. Т. Сытник, С. И. Яцько. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. № 4. С. 24–28.
25. V. Sytnik. CONSTRUCTION OF AN ANALYTICAL METHOD FOR LIMITING THE COMPLEXITY OF NEURAL-FUZZY MODELS WITH GUARANTEED ACCURACY/ B. Sytnik, V. Bryksin, S. Yatsko, Y. Vashchenko. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, ISSN 1729-4061 (Online), ISSN 1729-3774. 2019 Vol 2, NO4 (98)/ P. 8–13. URL:http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2%284%29_2
26. Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019. Vol 1, № (9 (97)). P 48–57. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>
27. Адаптивное управление в дискретных системах высокого порядка с запаздыванием. Ч. 1: Оптимизация на основе критерия гарантированной степени устойчивости / Б. Т. Сытник, В. Б. Сытник, В. А. Брыксин, В. С. Михайленко. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. № 2. С. 3–8.
28. Адаптивное управление в дискретных системах высокого порядка с запаздыванием. Ч. 2: Моделирование цифровой системы третьего порядка с запаздыванием с использованием критерия гарантированной степени устойчивости / Б. Т. Сытник, В. Б. Сытник, В. А. Брыксин, В. С. Михайленко. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2011. № 3. С. 14–19.
29. Адаптивное управление в дискретных системах высокого порядка с запаздыванием. Ч. 3: Синтез адаптивного частотно-импульсного ПИ-регулятора с оптимизацией параметров настройки на основе критерия гарантированной степени устойчивости / Б. Т. Сытник, С. И. Яцько, В. А. Брыксин, В. С. Михайленко. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2012. № 1. С. 71–79.
30. Бриксин В. О. Модели та методи автоматизованого керування рухом поїзда на основі адаптивної корекції швидкості: автореф. дис.... канд. техн. наук: спец. 05.13.03 / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2016. 20 с. Бібліогр.: С. 16–18.
[avtoreferat_2016_Bryksin_Modeli_ta_metody.pdf](http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/20137).
URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/20137>
31. Сытник Б. Т., Сытник В. Б., Яцько С. И. Синтез структуры и моделирование адаптивных цифровых фильтров и систем управления с нестационарными характеристиками. Ч. 2. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2004. № 1. С. 62–66.
32. Сытник Б. Т., Сытник В. Б. Синтез адаптивных дискретных регуляторов с заданными динамическими характеристиками. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2005. № 5. С. 3–26.
33. Структура автоматической системы нечеткого задания графика скорости движения подвижного объекта с ее коррекцией по фактическим параметрам проезда / Б. Т. Сытник, В. А. Брыксин, Д. В. Ломотько, В. В. Сытник, И. В. Давидов. *Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и средств телекоммуникаций на базе цифровизации: тезисы докладов 34 Международной конференции. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 3 (Додаток). С. 38–40
34. Моделі і методи створення систем реалізації графіків руху високошвидкісних поїздів з адаптивною корекцією швидкості за фактичними параметрами проїзду. Ч. 1: Структура автоматичної системи нечіткого задання графіка швидкості руху рухомого об'єкта з її корекцією за фактичними параметрами проїзду / Б. Т. Ситнік, В. О. Бриксін, Д. В. Ломотько, В. В. Ситнік, І. В. Давидов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 4. С. 24–35.

V. B. Sitnik, V. O. Briksin, I. V. Davydov. MODELS AND METHODS FOR CREATING SYSTEMS FOR IMPLEMENTING SCHEDULES OF HIGH-SPEED TRAINS WITH ADAPTIVE SPEED CORRECTION ACCORDING TO ACTUAL TRAVEL PARAMETERS. Part 2. Analysis of train speed control methods with DC and AC traction motors.

Abstract. An analysis of the existing methods for generating train speed control signals with direct or alternating current traction motors is presented, a block diagram of the train power transmission model and its individual blocks is proposed, a simplified block diagram of the DC power transmission control system model according to a given current traffic schedule is proposed, customization is proposed speed control systems to be corrected on the basis of based on the criterion of guaranteed degree of stability (CGSS) to ensure the quality of dynamic characteristics in transient modes, the main requirements of the model of an adaptive automatic train control system with a fuzzy task of speed and its automatic correction on the passage sections are formulated.

The object of research and design is an adaptive system for automatic handling by rail-mounted high-speed transport.

Currently, the railways of Ukraine operate electric trains of two electric traction systems direct current with a rated voltage in the contact network of 3,000 V and alternating current with a rated voltage of 25 kV. In addition, operational tests of a diesel train with traction asynchronous motors were carried out on the Southern Railway of Ukraine.

Analysis of the rest of the research and publications. The main technical data of electric trains that are in operation are given in [2, 3]. Most of them are ER2 and ER2T DC electric trains manufactured by the Riga Electric Machine Building Plant (REZ) and ER9 AC electric trains of various modifications. Since 2001, the production of HC "Luganskteplovoz" of domestic EPL2T and AC EPL9T electric trains has been started in Ukraine, the prototypes of which, respectively, are modifications of the ER2T and ER9T electric trains [3,10].

The first of the high-speed electric trains was a DC electric train with a voltage of 3000 V with DC electric motors of series excitation ER200 for intercity transportation at a speed of 200 km/h, manufactured by REZ. On the electric train, a system was provided for driving the train, both by the driver and the driver [2, 3]. In recent years, intensive robots have been carried out to create high-speed and high-speed electric trains, taking into account the requirements of the Eurostandard of UIC railways in terms of technical level, traffic safety indicators, environmental standards, level of service and economy of passenger transportation, both with DC traction motors and traction asynchronous motors. In general, in comparison with serial electric trains, due to the introduction of new technical solutions, it is expected to obtain the following technical and economic advantages [28]:

- increase in traction and energy performance (reduction of electricity consumption by 25-30%, operating costs for scheduled and unscheduled repairs by 30-40%);
- increase in overhaul runs and the possibility of switching to a new system for repair and maintenance according to technical condition;
- reduction of capital and operating costs;

On the research electric train ED6-0001 [28, 35], asynchronous traction motors with a squirrel-cage rotor are used. To control the motors, semiconductor converters based on IGBT transistors from Hitachi (Japan) are used. As an example, [9] presented the world's largest railway manufacturer - Bombardier Transportation at the Eurail Speed Congress 2005 and the exhibition in Milan in the form of models, models and virtual presentations, the project of a promising high-speed high-speed Zefiro train with distributed traction at a maximum speed of 350km/h

Train power transmission traction motors are used in both AC and DC.

When considering a train as a control object, it is possible to single out the main operating moments: the traction moment of the train M_T and the load moment M_H [2-6, 11-15]. Thus, the node for determining the engine speed n must consist of a traction torque model and a load torque model.

For the case of speed control by changing the supply voltage, a DC source controlled by some converter is required. For the case of speed control by changing the supply voltage, a DC source controlled by some converter is required. The converter is characterized in the general case by EMF E_P , internal resistance R_P and gain $k_P = E_P/U_U$, where U_U is the input control signal. This method is often used in systems with a "generator - engine" scheme. The main advantages of such systems are a large range and smoothness of engine speed control, high rigidity and linearity of characteristics, the possibility of obtaining all power modes of engine operation. As a controlled source, converters based on pulse-width regulation (PWR) and pulse-width modulation (PWM) can be used at a constant value of the supplied voltage. This method of controlling the speed, current and torque of the electric drive is associated with a periodic pulse change in the parameters of any elements of the electric circuits of the motor (for example, an additional resistor or voltage supplied to the motor).

Controlling the speed of rotation of the motor rotor by changing the excitation current is used in cases where it is necessary to expand the limits of regulation by increasing the angular velocity above the main one when the motor is loaded with rated current. In this case, the change in the excitation current is carried out by shunting the excitation winding of the motor. Modern models of traction rolling stock are complex technical objects with highly intelligent control systems using programmable microprocessor controllers and microcomputers that use advanced information technologies. Most of the developed countries of the world are developing new designs, as a result of which there is lively competition in the market in terms of the introduction and development of the latest technologies. One of the areas of using information technologies is the integration into control systems of information tools that combine the functions of collecting and processing data, visualization and control of processes occurring in control systems. The results of modeling an adaptive control system (Fig. 9) with a fuzzy train speed (Fig. 10) will be presented in the third part of the work.

Conclusions

1. The analysis of existing ways of formation of signals of control of speed of the train with traction engines of a direct current or alternating current is given.

2. The structural scheme of the model of power transmission of the train and its separate blocks is offered. The mass of the train - m , the radius of the curve of the

path - r and the value of the slope of the track - j introduced into the proposed model for determining engine speed in addition to the known scheme to adapt the model to change these parameters when traveling sections.

3. A simplified block diagram of the model of the DC power transmission control system according to a given current traffic schedule is proposed.

4. It is shown that the control signal is formed by the speed controller by means of a controller actuator, the coordinates of which depend on the deviation between the current speed from the set traffic schedule depending on the current deviation between the set length of the route and the current train position. in this area

5. It is proposed [24, 27 - 29] to adjust the speed control system on the basis of CGSS to ensure the quality of dynamic characteristics in transient modes.

6. The window of an example of realization of viewing of the indistinct schedule of movement on a carriageway is resulted.

Keywords: model, adaptive system, schedule, high-speed train, adaptive speed correction, actual tracking parameters

Надійшла 31.01.2022 р.

Ситнік Борис Тимфійович, кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: bts12021947@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>

Бриксін Володимир Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: vladimir.bryksin@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-8036-8811>

Давидов Ілля Валерійович, аспірант кафедри «Інформаційні технології», Головний інженер «Харківського відділення» філії «Головний інформаційно-обчислювальний центр» АТ «Укрзалізниця» (ГІОЦ УЗ). E-mail: idc000@gmail.com <http://orcid.org/0000-0003-3658-4098>

Sytnik Borys, Ph.D., associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: bts12021947@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-9664-5617>

Bryksin Volodymyr, Ph.D., associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: vladimir.bryksin@gmail.com <http://orcid.org/0000-0002-8036-8811>

Davydov Ilya, graduate student of the Department of "Information Technology", Chief Engineer of the "Kharkiv Branch" of the branch "Chief Information - Computing Center" of JSC "Ukrzaliznytsia", Ukraine, Kharkiv. E-mail: idc000@gmail.com <http://orcid.org/0000-0003-3658-4098>