

УДК 629.429.3:621.314

Б. Х. ЄРІЦЯН (ХПІ), Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ (ХПІ)

Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна, ел. пошта: Bagish_Ericjan@ukr.net, lboris1911@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0003-0579-3882, orcid.org/0000-0002-2985-7345

МОДЕЛЮВАННЯ ГІБРИДНОЇ ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ НАХИЛУ КУЗОВА ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Вступ та постановка проблеми

Застосування технології нахилу кузовів вагонів на залізничному рухомому складі має більш ніж 50-річну історію. На сьогоднішній день в світі експлуатується більше 5000 поїздів з нахилом кузова. Аналіз даних про поїзда з кузовами, що нахилиються, показує, що:

- введення у регулярну експлуатацію поїздів з кузовами, що нахилиються почався порівняно недавно – з 1973 р;
- при формуванні поїздів використовується локомотивна і мотор-вагонна схема; застосовується дизельна і електрична тяга; кількість вагонів, як правило, не перевищує 10;
- для нахилу кузовів застосовуються пасивна, пасивно-активна і активна системи;
- максимальна швидкість коливається в межах 160...250 км/год; при пасивній системі кут нахилу складає 3°; примусовий нахил на 5°...8° забезпечується виконавчим механізмом на базі гідравлічного, пневматичного, електрогідравлічного або електромеханічного приводу;
- в системах управління використовуються гіроскопи, акселерометри, датчики на шляховій структурі і дані про шлях, що записані в бортових комп'ютерах.

В якості силового приводу механізму примусового нахилу кузова застосовуються гідравлічні, пневматичні, електрогідравлічні та електромеханічні системи.

Одним з перспективних систем приводів є електромеханічний. Системи з електромеханічним приводом мають найкращі масогабаритні показники і зводять до мінімуму кількість компонентів системи управління, але, з іншого боку, такі приводи мають знижений ККД внаслідок високонавантажених механічних вузлів, призначених для перетворення обертального руху крокового двигуна в поступальне переміщення штока.

З проблем, пов'язаних із застосуванням електромеханічного приводу є відсутність

самоповернення, що обумовлено наявністю в складі такого приводу гвинтової пари. Це призводить також до того, що перетворення електричної енергії в механічну відбувається опосередковано.

Літературний огляд

В якості приводу систем нахилу кузовів цих поїздів використовуються гідравлічні, пневматичні і електромеханічні системи [1,2,3]. Гідравлічна система залежить від погодних умов, екологічно недосконала через можливість витоків, її конструкція, експлуатація та ремонт відносно складні; пневматична система не забезпечує належного швидкодії; електромеханічна система, будучи найбільш перспективною, не забезпечує належного рівня безпеки руху через відсутність самоповороту механізму нахилу, у разі відмови застосовуваних ротативних електромеханічних перетворювачів спільно з редуктором [2,3]. На кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ» розроблена система нахилу кузова на основі лінійного двигуна, встановленого в систему коліскового підвішування вагона [2]. Така система дозволяє підвищити ККД приводу, оскільки не має у своєму складі редукторів і володіє можливістю самоповороту, успадкованої від коліскового підвішування. Основним недоліком такої системи є значні масогабаритні показники лінійного двигуна [2,4]. Для усунення цього недоліку нами пропонується сумарний кут нахилу реалізувати за рахунок спільного нахилу кузова лінійним приводом і пневматичним ресорним підвішуванням другого ступені, вже наявної на електропоїздах такого типу [4-7]. Застосування керованого ресорного пневмопідвішування апробовано у світовій практиці. При цьому значних змін в конструкції ресорного підвішування не потрібно, однак кут нахилу, реалізований таким приводом, не перевищує 2,5° [1,2,5], а швидкодія значно нижче електромеханічного приводу [1,2,5]. З іншого боку, як показали проведені нами дослідження, зниження максимального кута нахилу кузова з 7° до 5° дозволяє зменшити масу активних матеріалів і габарити приводу на 32...35 % [8]. Таким чином, нами пропонується для нахилу кузова застосовувати гібридну систему, що складається з лінійно-

© Єріцян Б. Х., Любарський Б. Г., 2017

го двигуна і регульованого пневмопідвищення другого ступеня. Нахил кузова на кут до 5° вона забезпечує за рахунок електромеханічного приводу, що має більшу швидкість, при великих кутах нахил проводиться за рахунок спільної дії електромеханічного і пневматичного приводів. [4–8].

Для визначення робочих властивостей запропонованої системи необхідно розробити математичну та імітаційну моделі такої системи нахилу кузова. Вони складаються з трьох основних блоків, що описують механічну частину системи нахилу кузова, систему електромеханічного перетворення енергії, а також пневматичне підвищення, що працює в режимі нахилу кузова.

Мета статті

Моделювання гібридної системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу, з одночасною роботою обох ступенів системи нахилу кузова – пневматичної та електромеханічної.

Основний матеріал дослідження

Математична модель системи гібридного приводу нахилу кузова. На рис. 1 наведена схема запропонованої гібридної системи нахилу кузова.

Сигнали, одержувані від блоку датчиків БД, а саме швидкість руху, поточне значення радіуса кривої, підвищення зовнішньої рейки, а також поточний кут нахилу кузова і швидкість його зміни, подаються на блок управління БУ, що формує на їх основі сигнали управління силовими ключами напівпровідникових перетворювачів НП1, НП2. Навантаженням перетворювачів є лінійні двигуни силового приводу ЛД1, ЛД2 механізму нахилу кузова, що живляться від енергоблоку ЕБ.

Пневматичні ресори збільшують свою висоту за рахунок подачі тиску від додаткового резервуару ДР через електрично керовані клапани подачі повітря КП1 та КП2, а зменшують за рахунок скидання тиску через електрично керовані клапани подачі повітря КС1 та КС2.

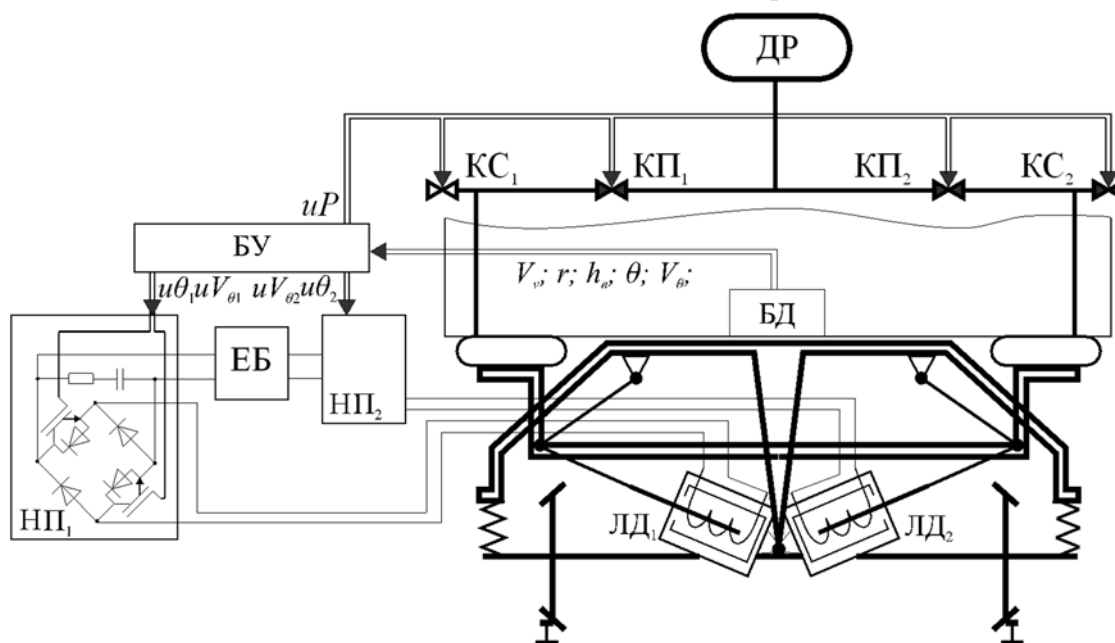


Рис. 1. Схема гібридного механізму нахилу кузова

Для моделювання механічної частини застосовані модулі та компоненти SimMechanics, моделювання коаксіального лінійного двигуна постійного струму електромагнітного типу зроблене з використанням компонентів SimPowerSystem. Пневматична частина приводу, система управління і зв'язку між механічною і електричною частинами здійснюються за допомогою S-модулів стандартних бібліотек MATLAB Simulink [9,10]. Робочі параметри і характеристики електромагнітного двигуна (сила втягування якоря, індуктивність і протиперс – залежно від проміжку і струму) задаються шляхом апроксимації залежностей, отриманих експериментально за допомогою імітацій-

ного моделювання в середовищі FEMM [11], поліномами Чебишева на безлічі рівновіддальних точок. Вказані апроксимації залежностей реалізовані у вигляді S – функцій і підключені до моделі. [4]

Показником, що характеризує вплив шляху на екіпаж, що рухається по ньому, є необхідний кут нахилу кузова екіпажу θ , при якому наявна повна компенсація непогашеного бічного прискорення.

Математична модель складається з трьох основних блоків, що описують механічну частину системи нахилу кузова, систему електромеханічного перетворення енергії, а також пневматич-

не підвищення, що працює в режимі нахилу кузова.

Ураховуючи наявність двох електромеханічних частин та двох пневморесор, диференціально-алгебраїчна система рівнянь, що визначає узагальнену математичну модель електромеханічної частини механізму нахилу, які наведено у [4-6], остаточно, набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{U_1 - i_1 R_1 - K_{31} V_{T1}}{L_1}; \quad \frac{dN_1}{dt} = V_{T1}; \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{U_2 - i_2 R_2 - K_{32} V_{T2}}{L_2}; \quad \frac{dN_2}{dt} = V_{T2}; \\ \frac{dv_1}{dt} &= \left(\begin{array}{l} (p_1 - p_a) F_{e1} - P_1 - \frac{np_1 F_{e1}^2}{V_{star1} - x_1 \Delta V_1} x_1 - \\ - \frac{0,126 F_{e1}^2 g}{f_{s1}^3} \frac{p_1}{RT_{M1}} v_1 \end{array} \right) / m_1; \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{k \mu_1 f_1 K_{PM} \sqrt{RT_{M1}}}{F_{e1}(x_{01} + x_1)} \varphi(\sigma_1) - \frac{kp_1}{(x_{01} + x_1)} v_1; \\ \frac{dx_1}{dt} &= v_1; \\ \frac{dv_2}{dt} &= \left(\begin{array}{l} (p_2 - p_a) F_{e2} - \\ - P_2 - \frac{np_2 F_{e2}^2}{V_{star2} - x_2 \Delta V_2} x_2 - \\ - \frac{0,126 F_{e2}^2 g}{f_{s2}^3} \frac{p_2}{RT_{M2}} v_2 \end{array} \right) / m_2; \\ \frac{dp_2}{dt} &= \frac{k \mu_2 f_2 K_{PM} \sqrt{RT_{M2}}}{F_{e2}(x_{02} + x_2)} \varphi(\sigma_2) - \frac{kp_2}{(x_{02} + x_2)} v_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= v_2; \\ \frac{dU_{Cd1}}{dt} &= \frac{i_{d1}}{C_{d1}}; \quad \frac{dU_{Cd2}}{dt} = \frac{i_{d2}}{C_{d2}}; \\ -U_{uc} + i_{d1} R_{d1} + U_{Cd1} &= 0; \\ -U_{uc} + i_{VT1} R_{VT1} + U_1 + i_{VD1} R_{VD1} &= 0; \\ i_{d1} R_{d1} + U_{Cd1} + i_{VD1} R_{VD1} + U_1 + i_{VD1} R_{VD1} &= 0; \\ i_{VT1} R_{VT1} + U_1 + i_{VD1} R_{VD1} &= 0; \\ i_{uc1} + i_{VD1} - i_{VT1} - i_{d1} &= 0; \\ -i_{uc1} - i_{VD1} + i_{VT1} - i_{d1} &= 0; \\ i_{VT1} + i_{VD1} - i_1 &= 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -U_{uc} + i_{d2} R_{d2} + U_{Cd2} &= 0; \\ -U_{uc} + i_{VT2} R_{VT2} + U_2 + i_{VD2} R_{VD2} &= 0; \\ i_{d2} R_{d2} + U_{Cd2} + i_{VD2} R_{VD2} + \\ + U_2 + i_{VD2} R_{VD2} &= 0; \\ i_{VT2} R_{VT2} + U_2 + i_{VD2} R_{VD2} &= 0; \\ i_{uc2} + i_{VD2} - i_{VT2} - i_{d2} &= 0; \\ -i_{uc2} - i_{VD2} + i_{VT2} - i_{d2} &= 0; \\ i_{VT2} + i_{VD2} - i_2 &= 0; \\ i_{uc} &= i_{uc1} + i_{uc2}; \\ \theta &= f(x_1, x_2, N_1, N_2), \end{aligned}$$

де U_{uc} – напруга джерела живлення; $U_{1,2}$ – напруга на електромагнітних двигунах; $U_{cd1,2}$ – напруга на ємностях демпфуючого кола; i_{uc} – струм джерела живлення; $i_{uc1,2}$ – струми інверторів; $i_{VD1,2}$, $i_{VD2,2}$ – струми діодів $VD1$, $VD2$ першого та другого двигунів відповідно; $i_{VT1,2}$, $i_{VT2,2}$ – струми ключів $VT1$, $VT2$ першого та другого двигунів відповідно; $i_{d1,2}$ – струми демпфуючих кіл; $i_{1,2}$ – струми живлення лінійних двигунів; $R_{d1,2}$ – обмежувач опір демпфуючого кола лінійних двигунів; $R_{1,2}$ – опір обмоток лінійних двигунів; $C_{d1,2}$ – ємності демпфуючих кіл; $L_{1,2}$ – індуктивності лінійних двигунів; K_{31} , K_{32} – коефіцієнти при проти ЕРС двигунів; $N_{1,2}$ – переміщення якорів лінійних двигунів; $V_{T1,2}$ – швидкості переміщення якорів двигунів; $R_{VD1,2}$, $R_{VD2,2}$ – опори керованих резисторів – еквівалентів діодів $VD1$, $VD2$, $R_{VT1,2}$, $R_{VT2,2}$ – опори керованих резисторів – еквівалентів ключів $VT1$, $VT2$; t – час; $k = 1,4$ – показник адіабати; μ – коефіцієнт витрати, $f_{1,2}$ – площа вхідних отворів пневморесор; $K = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}$; p_m –

тиск у магістралі; $T_{m1,2}$ – температура повітря у пневморесорах; $F_{e1,2}$ – ефективна площа пневморесор; $x_{01,2}$ – початкові координати руху днищ пневморесор; $F_{1,2}$ – ефективні площі пневморесор; $V_{start1,2}$ – сумарний початковий об'єм порожньої частини пневморесор та додаткових резервуарів; $\varphi(\sigma)$ – функція витрати повітря (витратна функція); $v_{1,2}$ – швидкість переміщення пневморесор; g – прискорення вільного падіння; $R = 287$ Дж/кг·К – газова постійна; $m_{1,2}$ – маси, що припадають на пневморесори; $x_{1,2}$ – хід (переміщення верхнього днища) пневморесор; $p_{1,2}$ – тиск у пневморесорах; p_a – атмосферний тиск; $P_{1,2}$ – результуюча усіх сил, що здійснюють тиск на пневморесори 1 та 2 відповідно; $f(x_1, x_2, N_1, N_2)$ – функція що ви-

© Срічан Б. Х., Любарський Б. Г., 2017

значає сумарний кут нахилу механізму; n – показник політропи; $\Delta V_{1,2}$ – питоме змінення об’єма пневморесор. Додатковий індекс 1 або 2 визначає приналежність до лівої або правої сторони.

Таким чином, отримана узагальнена математична модель у вигляді сукупності диференціальних рівнянь, що описують усі вузли і ланки передачі потужності від джерела електричної енергії до виконавчого механізму – балки, що нахиляється, а також роботу керованого пневматичного підвішування. Вона встановлює зв’язки геометричних, силових і електрофізичних параметрів з величинами, що характеризують якість та ефективність роботи як окремих механізмів, так і облаштування приводу нахилу кузова в цілому. Особливістю цієї моделі є застосування методу кінцевих елементів для ідентифікації параметрів лінійного двигуна, а також визначення параметрів пневморесори за допомогою витратної функції [4, 5].

Імітаційна модель механізму нахилу кузова. Вирішення математичних моделей здійснювалося за допомогою імітаційного моделювання у середовищі MATLAB / Simulink [9,10].

Блок-схема загальної моделі представлена на рис. 2.

Імітаційна модель складається з наступних основних блоків: приводу нахилу кузова, перетворювача і модулів керування та контролю.

Привід нахилу кузова містить підсистему моделювання лінійного двигуна magnit, та допоміжну підсистему mehanika, яка у свою чергу містить підсистему моделювання механічної частини mekhanizm.

Вхідним параметром цієї допоміжної підсистеми є сила, що реалізовується на якорі лінійного двигуна, вихідними параметрами - проміжок x між якорем лінійного двигуна і опорою статора, кут θ нахилу кузова екіпажа ($tetatek$) і швидкість його зміни ($Vtek$). Сигнал x подається на вхід підсистеми «magnit», як і сигнал U , що є напругою на електромагнітному двигуні і отриманий з відповідного виходу перетворювача. Вихідним параметром підсистеми magnit є сила F , що діє у робочому зазорі лінійного двигуна приводу нахилу. Також вихідним є струм і лінійного двигуна.

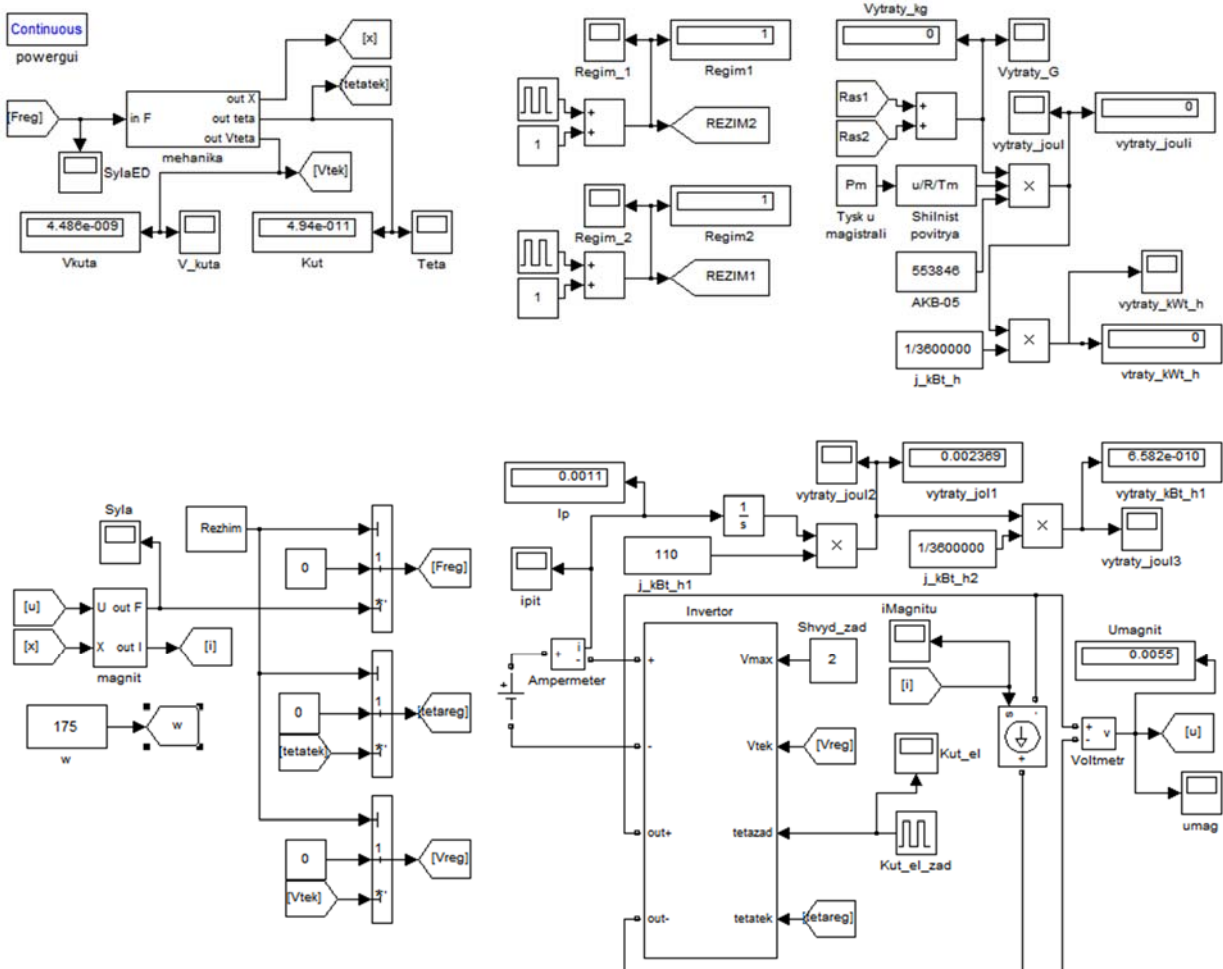


Рис. 2. Блок-схема загальної моделі системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу

Наведена модель відрізняється від попередніх [2,3] тим, що сила, додана до механізму нахилу, залежить від режиму роботи механізму, та є керованою за допомогою блоку Rezim.

Таким чином, отримана імітаційна модель процесів електромеханічного перетворення енергії в системі нахилу кузовів, яка дозволяє визначити залежність змін параметрів системи нахилу кузова (струм та напругу на ділянках напівпровідникового перетворювача, хід якоря двигуна, хід пневморесори, зміна тиску у пневморесорах) та енергетичних параметрів механізму (втрати енергії на нахил кузова електричного та пневматичного приводів, розхід повітря) від заданого куту нахилу кузова.

Результати моделювання роботи системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу. Моделювання механізму нахилу кузова проводилось у найбільш напруженому режимі. Задано максимальний кут нахилу кузова, як

електричним – 5° , так і пневматичним приводом $2,1^\circ$. Моделювання проводилось при заданій швидкості нахилу $2^\circ/\text{сек}$. Процес нахилу складається з наступних етапів:

- від 0 до 2 сек. попередній процес підготовки, у якому вага кузова та механізм нахилу встановлюються у заданому положенні в залежності від номінального тиску у пневморесорах, проходить процес попереднього заряду конденсатора С у напівпровідниковому перетворювачі;

- від 2 сек. до близько 7 сек. проходить процес нахилу кузова до заданого кута;

- від близько 7 сек. до 13 сек. механізм нахилу підтримує заданий кут нахилу;

- від 13 сек. до близько 18 сек. механізм нахилу повертає кузов у вихідне положення.

Результати моделювання наведені на рис. 3 – 16.

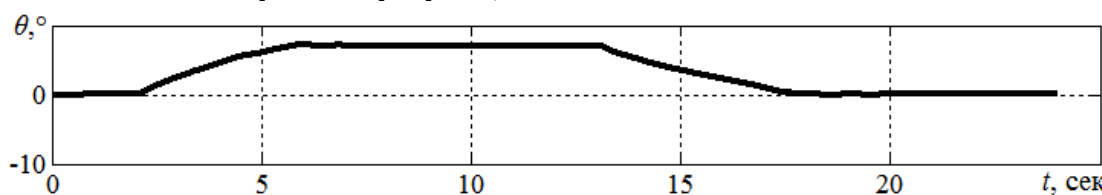


Рис. 3. Залежність загального кута нахилу кузова від часу

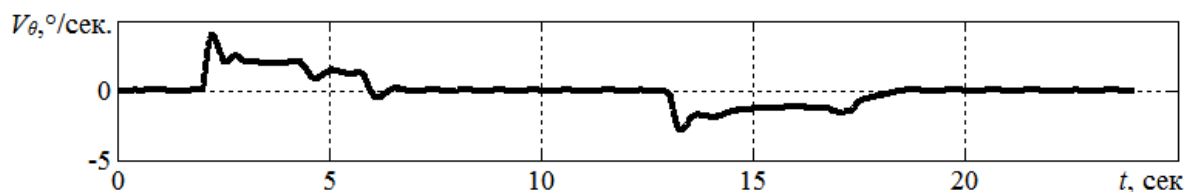


Рис. 4. Залежність загальної швидкості нахилу кузова від часу

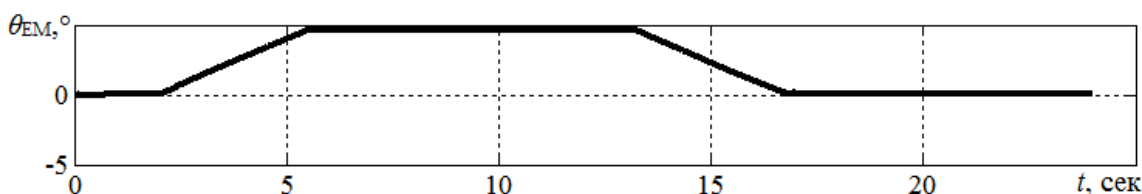


Рис. 5. Залежність кута нахилу проміжної балки, реалізованого лінійними двигунами, від часу

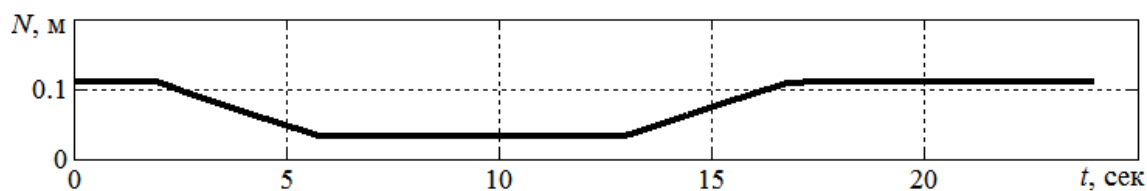


Рис. 6. Залежність робочого зазору лінійного двигуна від часу

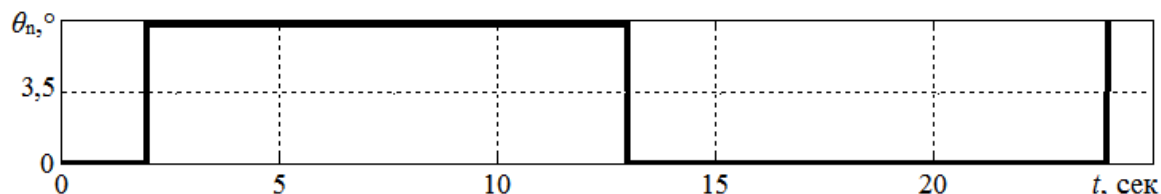


Рис. 7. Залежність заданого кута нахилу кузова від часу

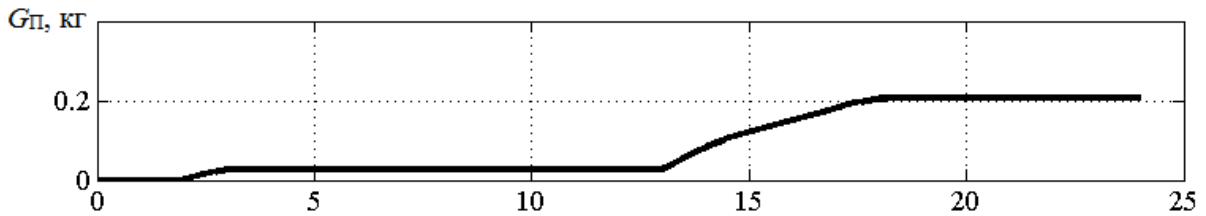


Рис. 8. Залежність вагової витрати повітря від часу

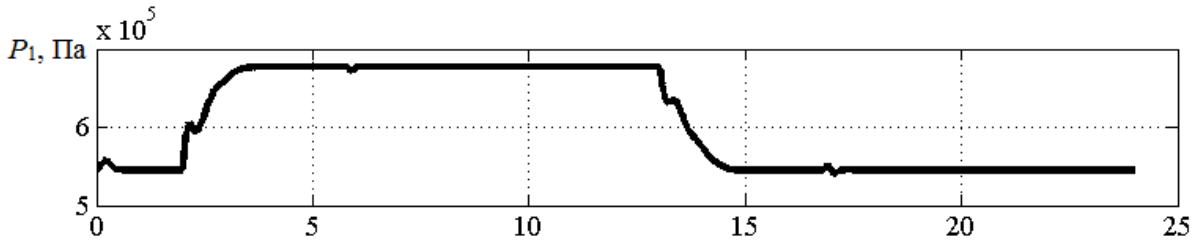


Рис. 9. Залежність тиску у першій пневморесорі від часу

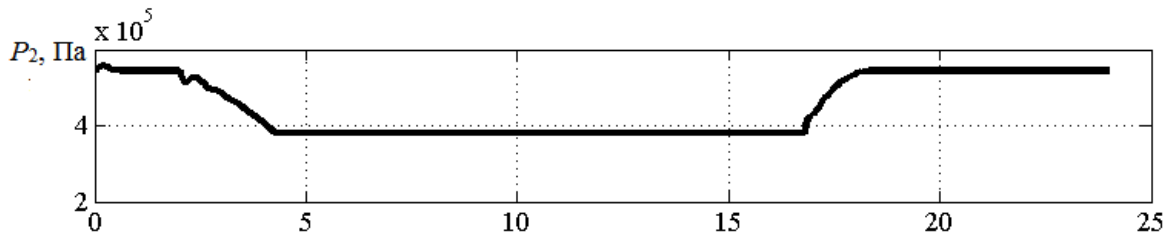


Рис. 10. Залежність тиску у другій пневморесорі від часу

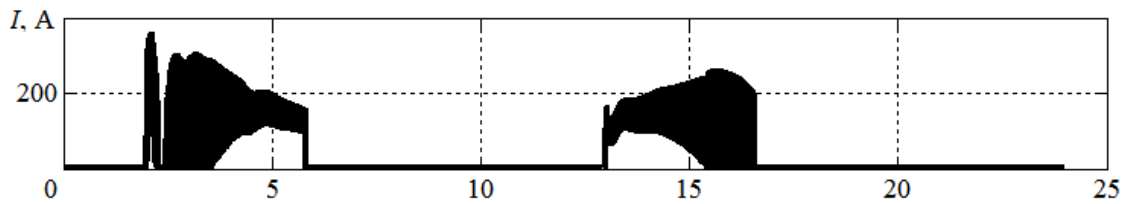


Рис. 11. Залежність струму лінійного двигуна від часу

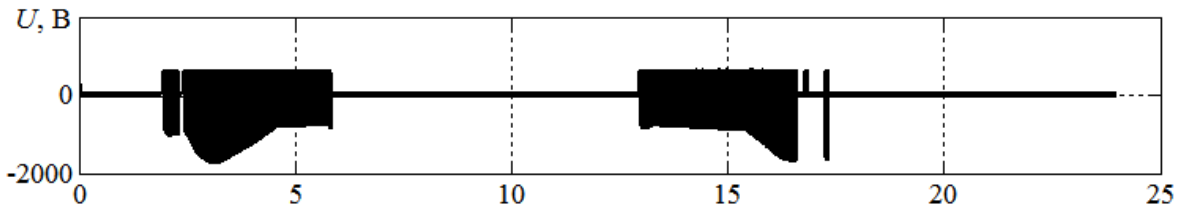


Рис. 12. Залежність напруги лінійного двигуна від часу

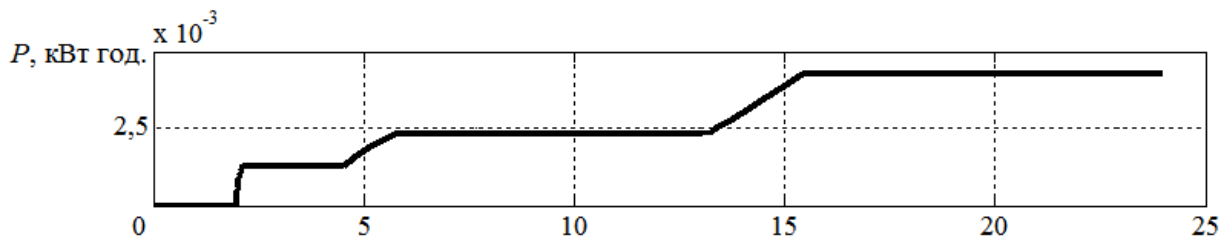


Рис. 13. Залежність витрат енергії лінійних двигунів від часу

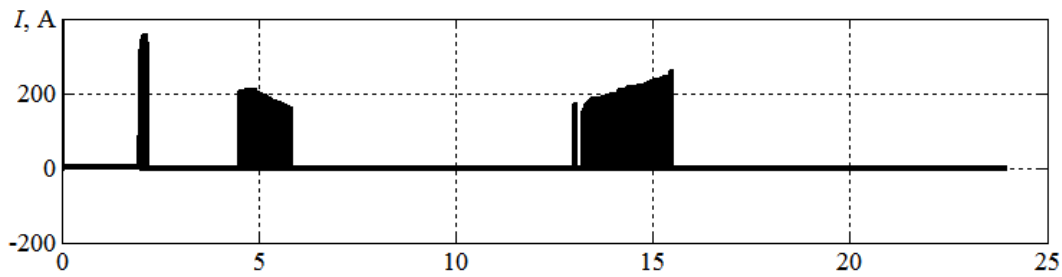


Рис. 14. Залежність струму, що притикає у джерелі живлення напівпровідникового перетворювача від часу

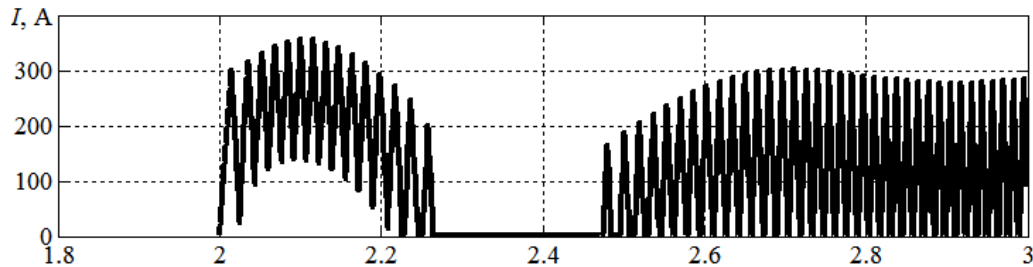


Рис. 15. Фрагмент залежності струму лінійного двигуна від часу

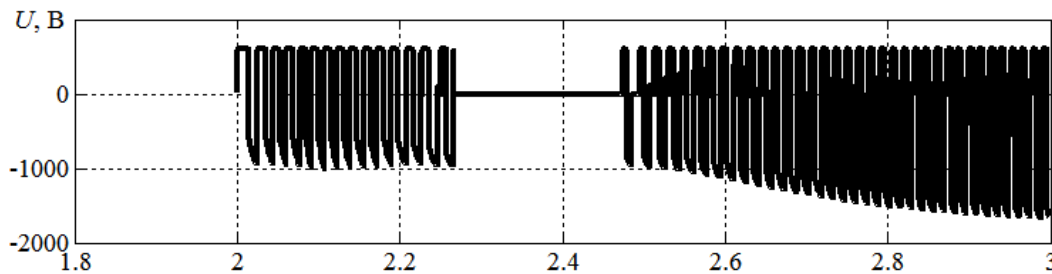


Рис. 16. Фрагмент залежності напруги ЛД1 від часу

Висновки

1. Запропоновано узагальнену математичну модель у вигляді сукупності диференціальних рівнянь, що описують усі вузли і ланки передачі потужності від джерела електричної енергії до виконавчого механізму – балки, що нахиляється, а також роботу керованого пневматичного підвищення. Вона встановлює зв'язки геометричних, силових і електрофізичних параметрів з величинами, що характеризують якість та ефективність роботи, як окремих механізмів, так і облаштування приводу нахилу кузова в цілому. Особливістю цієї моделі є застосування методу кінцевих елементів для ідентифікації параметрів лінійного двигуна, а також визначення параметрів пневморесори за допомогою витратної функції.

2. В зв'язку з тим, що пряме рішення системи рівнянь спільно з іншими складовими приводу є досить складним і громіздким завданням, нами пропонується для моделювання механічної час-

тині приводу нахилу використати середовище MATLAB Simulink і його складову SimMechanics.

3. Розроблена імітаційна модель процесів електромеханічного перетворення енергії в системі нахилу кузовів, яка дозволяє визначити залежність змін параметрів системи нахилу кузова (струм та напругу на ділянках напівпровідникового перетворювача, хід якоря двигуна, хід пневморесори, зміна тиску у пневморесорах) та енергетичних параметрів механізму (втрати енергії на нахил кузова електричного та пневматичного приводів, розхід повітря) від заданого куту нахилу кузова.

4. Задля пониження порядку імітаційної моделі, в ній наведено блок-схему лише одного лінійного двигуна та його напівпровідникового перетворювача, оскільки одночасна робота двох двигунів не розглядається.

5. Знайдені основні залежності енергетичних показників приводу нахилу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корниенко В. В. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт / В.В. Корниенко, В.И. Омеляненко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 159 с.
2. Якунин, Д. И. Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов

REFERENCES

1. Kornienko V. V. Vysokoskorostnoy elektricheskiy transport. Mirovoy opyt / V.V. Kornienko, V.I. Omelyanenko. – Harkov: NTU «HP», 2007. – 159 s.
2. Yakunin, D. I. Elektromekhanicheskaia sistema privoda s lineynym dvigatelem dlia naklona kuzovov

скоростного подвижного состава. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09. – «Электротранспорт». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». Харьков, – 2010. 202 с.

3. Єрїця́н Б.Х. Синтез комбінованої системи нахилу кузова швидкісного електричного рухомого складу. – Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09. – «Електро-транспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, – 2016. 189 с.

4. Любарський Б. Г. Математична модель електромеханічної частини комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу / Б. Г. Любарський, Б. Х. Єрїця́н, Д. І. Якунін // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 11. – С. 50-54.

5. Єрїця́н Б. Х. Математична модель пневматичної частини комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу / Б. Х. Єрїця́н, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 10. – С. 200-204.

6. Єрїця́н Б. Х. Імітаційна модель комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу / Б. Х. Єрїця́н, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2015. – Вип. 4. – С. 97-103.

7. Єрїця́н Б. Х. Імітаційне моделювання комбінованого приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду / Б. Х. Єрїця́н, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Механіка та машинобудування. – 2015. – № 1. – С. 48-55.

8. Любарський Б. Г. Оптимізація параметрів лінійного двигуна нахилу кузова транспортних засобів / Б. Г. Любарський, Б. Х. Єрїця́н, Д. І. Якунін, М. Л. Глебова // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2015. – № 41. – С. 58-66.

9. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс / Ю. Лазарев. – СПб.: Питер; Киев: Изд. группа BHV, 2005. – 512 с.

10. И.В. Черных. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е издание, 2007 год, 288 стр., формат 17x24 см, мягкая обложка, ISBN 978-5-388-00020-0.

11. David Meeker Finite Element Method Magnetics : 2013 Magnetics Tutorial <http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>.

скоростного подвижного состава. – Dissertatsiia na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tehnikeskikh nauk po spetsialnosti 05.22.09. – «Elektrotransport». Natsionalniy tehnikeskiiy universitet «Kharkovskiy politehnicheskiiy institut». Kharkiv, – 2010. 202 s.

3. Yeritsian B. Kh. Sintez kombinovanoi sistemi nahilu kuzova shvidkисnogo elektrichnogo ruhomogo skladu. – Disertatsiia na zdobuttia naukovogo stupenia kandidata tehnikeskikh nauk za spetsialnistju 05.22.09. – «Elektrotransport». Natsionalniy tehnikeskiiy unіversitet «Kharkivskiy politehnichniiy Institut». Kharkiv, – 2016. 189 s.

4. Lyubarskiy B. G. Matematichna model elektromehanichnoyi chastini kombinovanogo pnevmatichnogo ta elektromehanichnogo privodu nahilu kuzova transportnogo zasobu / B. G. Lyubarskiy, B. Kh. Yeritsian, D. I. Yakunin // Sistemi obrobki Informatsiyi. – 2015. – Vip. 11. – S. 50-54.

5. Yeritsian B. Kh. Matematichna model pnevmatichnoyi chastini kombinovanogo pnevmatichnogo ta elektromehanichnogo privodu nahilu kuzova transportnogo zasobu / B. Kh. Yeritsian, B. G. Lyubarskiy, D. I. Yakunin // Sistemi obrobki Informatsiyi. – 2015. – Vip. 10. – S. 200-204.

6. Yeritsian B. Kh. Imitatsiyina model kombinovanogo pnevmatichnogo ta elektromehanichnogo privodu nahilu kuzova transportnogo zasobu / B. Kh. Yeritsian, B. G. Lyubarskiy, D. I. Yakunin // Zbirnik naukovih prats Kharkivskogo universitetu Povitryanih Sil. – 2015. – Vip. 4. – S. 97-103.

7. Yeritsian B. Kh. Imitatsiyne modelyuvannya kombinovanogo privodu nahilu kuzova shvidkисnogo elektropoyizdu / B. Kh. Yeritsian, B. G. Lyubarskiy, D. I. Yakunin // Mehanika ta mashinobuduvannya. – 2015. – № 1. – S. 48-55.

8. Lyubarskiy B. H. Optymizatsiia parametriv liniinoho dvyhuna nakhylu kuzova transportnykh zasobiv / B. H. Lyubarskiy, B. Kh. Yeritsian, D. I. Yakunin, M. L. Hliebova // Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu "KhPI". – 2015. – № 41. – S. 58-66.

9. Lazarev Yu. Modelirovanie protsessov i sistem v MATLAB. Uchebniy kurs / Yu. Lazarev. – SPb.: Piter; Kiev: Izd. gruppa BHV, 2005. – 512 s.

10. I. V. Chernykh. Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. 1-e izdanie, 2007 god, 288 str., format 17x24 sm, myagkaya oblozhka, ISBN 978-5-388-00020-0.

11. David Meeker Finite Element Method Magnetics: 2013 Magnetics Tutorial <http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>.

Надійшла до друку 15.05.2017.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Хворост М. В.*

В науковій статті розглянуто актуальну проблему моделювання гібридної системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу залізничного транспорту. Вона складається з пневматичного та електромеханічного ступенів та дозволяє уникнути істотного обмеження швидкості проходження кривих ділянок рейкового шляху, що суттєво підвищує середньошляхову швидкість. У статті розглянуто імітаційну модель, що створена у середовищі MATLAB. Запропоновані системи управління комбінацією ступенів системи нахилу кузовів швидкісного рухомого складу залізничного транспорту. Проведено комплекс досліджень режиму нахилу з використанням обох ступенів гібридного механізму. Визначені динамічні показники складових запропонованого механізму, які дозволяють надати практичних рекомендацій щодо вибору параметрів елементів напівпровідникового перетворювача, пневматичних та електромеханічних пристроїв гібридної системи нахилу, а також визначити сили, що діють в елементах механізму нахилу.

Ключові слова: гібридний привод; пневморесора; імітаційна модель; нахил кузову; швидкість руху.

УДК 629.429.3:621.314

Б. Х. ЕРИЦЯН (ХПИ), Б. Г. ЛЮБАРСКИЙ (ХПИ)

Кафедра электрического транспорта и тепловозостроения, Национальной технической университет «Харьковской политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, 61002, Украина, эл. почта: Bagish_Ericjan@ukr.net, lboris1911@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0003-0579-3882, orcid.org/0000-0002-2985-7345

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАКЛОНА КУЗОВА СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В научной статье рассмотрена актуальная проблема моделирования гибридной системы наклона кузова скоростного подвижного состава железнодорожного транспорта. Она состоит из пневматического и электромеханического ступеней и позволяет избежать существенного ограничения скорости прохождения кривых участков рельсового пути, существенно повышает среднелучевую скорость. В статье рассмотрена имитационная модель, созданная в среде MATLAB. Предложены системы управления комбинацией ступеней системы наклона кузовов скоростного подвижного состава железнодорожного транспорта. Проведен комплекс исследований режима наклона с использованием обеих степеней гибридного механизма. Определены динамические показатели составляющих предложенного механизма, которые позволяют дать практические рекомендации по выбору параметров элементов полупроводникового преобразователя, пневматических и электромеханических устройств гибридной системы наклона, а также определить силы, действующие в элементах механизма наклона.

Ключевые слова: гибридный привод; пневморессора; имитационная модель; наклон кузова; скорость движения.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Хворост Н. В.*

UDC 629.429.3:621.314

B. Kh. YERITSYAN (KhPI), B. G. LIUBARSKYI (KhPI)

Department of Transport and electric locomotive, The National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine, Bagish_Ericjan@ukr.net, lboris1911@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0003-0579-3882, orcid.org/0000-0002-2985-7345

MODELING OF THE HYBRID ELECTROPNEUMATIC SYSTEM OF THE TILT OF THE BODY OF THE SPEED ELECTRIC FITTING COMPOSITION

In the scientific article the actual problem of simulation of the hybrid system of the tilt of the body of the high-speed rolling stock of the railway transport is considered. It consists of pneumatic and electromechanical stages and allows to avoid a significant restriction of the speed of passage of curved sections of the track, significantly increases the average travel speed. In the article the simulation model created in MATLAB environment is considered. The control systems of a combination of steps of a system of an inclination of bodies of a high-speed rolling stock of the railway transportation are offered. A complex of studies of the mode of tilt with the use of both degrees of the hybrid mechanism was carried out. Dynamic indices of the components of the proposed mechanism are determined, which make it possible to give practical recommendations on the choice of the parameters of the semiconductor converter elements, pneumatic and electromechanical devices of the hybrid tilt system, and also determine the forces acting in the elements of the tilt mechanism.

Keywords: hybrid drive; air spring; imitation model; body tilt; travel speed.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Khvorost M. V.*