

Розглянуто імітаційну модель комбінованої системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу залізниць. Визначено характер зміни механічних, електричних, пневматичних та енергетичних параметрів у часі, а також їх амплітудні значення, що визначають вибір елементної бази напівпровідникових перетворювачів, параметри та типи балонів пневморесор і навантаження в елементах надвізкової будови рухомого складу. Результати можливо використати при проектуванні швидкісного рухомого складу без суттєвої реконструкції існуючої транспортної інфраструктури

Ключові слова: комбінований привід, імітаційна модель, нахил кузова, швидкість руху, пневморесор, лінійний двигун

Рассмотрена имитационная модель комбинированной системы наклона кузова скоростного подвижного состава железных дорог. Определен характер изменения механических, электрических, пневматических и энергетических параметров во времени, а также их амплитудные значения, определяющие выбор элементной базы полупроводниковых преобразователей, параметры и типы баллонов пневморесор и нагрузки в элементах надтележного строения подвижного состава. Результаты можно использовать при проектировании скоростного подвижного состава без существенной реконструкции существующей транспортной инфраструктуры

Ключевые слова: комбинированный привод, имитационная модель, наклон кузова, скорость движения, пневморесора, линейный двигатель

УДК 629.429.3:621.313

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66782

МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ НАХИЛУ КУЗОВУ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Б. Х. Єріцян

Старший викладач*

E-mail: bagish_ericjan@ukr.net

Б. Г. Любарський

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: lboris19111972@mail.ru

Д. І. Якунін

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: unicomber@ukr.net

*Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»

вул. Багалия, 21, м. Харків, Україна, 61002

1. Вступ

Підвищення швидкості руху можна здійснити двома основними шляхами. По-перше, можна відмовитися від використання кривих порівняно малого радіуса, оскільки в пологих кривих вплив відцентрової сили на пасажирів невелике і може бути скомпенсована за рахунок конструктивних особливостей шляху [1]. Так вчинили у Франції, запустивши в експлуатацію з 1981 року високошвидкісні потяги TGV. Такий підхід не потребує кардинальної зміни конструкції транспортного засобу [1, 2]. Тим не менше, створення принципово нової інфраструктури транспортних колій вимагає досить значних капіталовкладень. По-друге, можна залишити в експлуатації існуючу мережу транспорту, вживши заходів по зміні її конструкції, що дозволяють підвищити швидкість проходження кривих за рахунок впровадження систем нахилу кузовів [3, 4]. Своєю основною ринковою нішею розробники цих транспортних засобів вважають рухомий склад для швидкісних сполучень на існуючих лініях з великим числом кривих і підйомів без особливих вимог до стану інфраструктури [5]. Транспортні засоби з кузовами, що нахилиються

ся, є найменш витратною технологією для створення швидкісного руху на існуючих ділянках транспортних магістралей, що містять велику кількість кривих (залізниця, аеродроми та інше) [6, 7]. Одним з прикладів такого підходу є введення в експлуатацію швидкісних поїздів S-130, які дозволили забезпечити можливість безпересадочного сполучення між низькою міст Іспанії [8]. В Австралії система нахилу кузова рухомого складу дозволила поїздам, що працюють на модернізованій вузькоколінійній ділянці в Квінсленді, підвищити швидкість руху до 160 км/год. [9, 10]. У Великобританії розроблено потяг з примусовим нахилом кузова з метою застосування на звивистих маршрутах Шотландії [11].

В даний час приводи нахилу кузовів застосовуються на електропоїздах, що експлуатуються в багатьох країнах світу, включаючи Австралію [9], Німеччину [6], Іспанію [8], Італію [7], Канаду, Китай [11, 12], Норвегію, Португалію, Словенію, США, Фінляндію [2, 4], Францію [13], Швейцарію [14–16], Швецію [17] та Японію [18, 19]. Таким чином, робота направлена на розвиток систем нахилу кузовів рухомого складу, є актуальною для розвитку швидкісного руху на залізницях в усьому світі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для реалізації нахилу кузова застосовані приводи різних типів, однак кожний з них має свої недоліки та переваги, як конструкційні або енергетичні, так і експлуатаційні та в царині безпеки.

В якості приводу систем нахилу кузовів цих поїздів використовуються гідравлічні [20], пневматичні [18] і електромеханічні системи [2, 3, 14, 15], або пасивна система нахилу, що приводиться в дію за рахунок відцентрових сил [8, 21]. Гідравлічна система залежить від погодних умов, екологічно недосконала через можливість витоків, її конструкція, експлуатація та ремонт відносно складні [2]; пневматична система не забезпечує належного швидкодії [2, 22]; електромеханічна система, будучи найбільш перспективною [14, 15], не забезпечує належного рівня безпеки руху через відсутність самоповороту механізму нахилу, у разі відмови застосовуваних ротативних електромеханічних перетворювачів спільно з редуктором [23, 24]. На кафедрі електричного транспорту та тепловозбудування НТУ «ХПІ» (Харків, Україна) розроблена система нахилу кузова на основі лінійного двигуна, встановленого в систему, подібну до коліскового підвищення вагона [2]. Така система дозволяє підвищити ККД приводу, оскільки не має у своєму складі редукторів і реалізує можливість самоповернення, успадковану від коліскового підвищення, тому вона прийнята за базову конструкцію. Основними недоліками такої системи є значні масові та габаритні показники лінійного двигуна [23]. Для усунення цього недоліку авторами в [24] запропоновано сумарний кут нахилу реалізувати за рахунок спільного нахилу кузова лінійним приводом і пневматичним ресорним підвищенням другого ступеня, вже наявного на електропоїздах такого типу. Застосування керованого ресорного пневмопідвищення апробовано у світовій практиці [18]. При цьому значних змін в конструкції ресорного підвищення не потрібно, однак кут нахилу, реалізований таким приводом, не перевищує $2,5^\circ$ [8, 22], а швидко-

дія значно нижча, ніж у електромеханічного приводу [15, 25]. З іншого боку, як показали проведені дослідження, зниження максимального кута нахилу кузова з 7° до 5° дозволяє зменшити масу активних матеріалів і габарити приводу на 32..35% [26].

3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету моделювання комбінованої системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу залізничного транспорту, з одночасною роботою обох ступенів системи нахилу кузова – пневматичної та електромеханічної.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розробити математичну, імітаційно-орієнтовану модель для застосування її в сучасних системах комп'ютерної математики, зокрема, в пакеті візуального програмування MATLAB;
- провести тестове імітаційне моделювання роботи комбінованого приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду та встановити залежності змін його основних енергетичних показників у часі.

4. Математична модель системи комбінованого приводу нахилу кузова

На рис. 1 наведена схема запропонованої комбінованої 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.

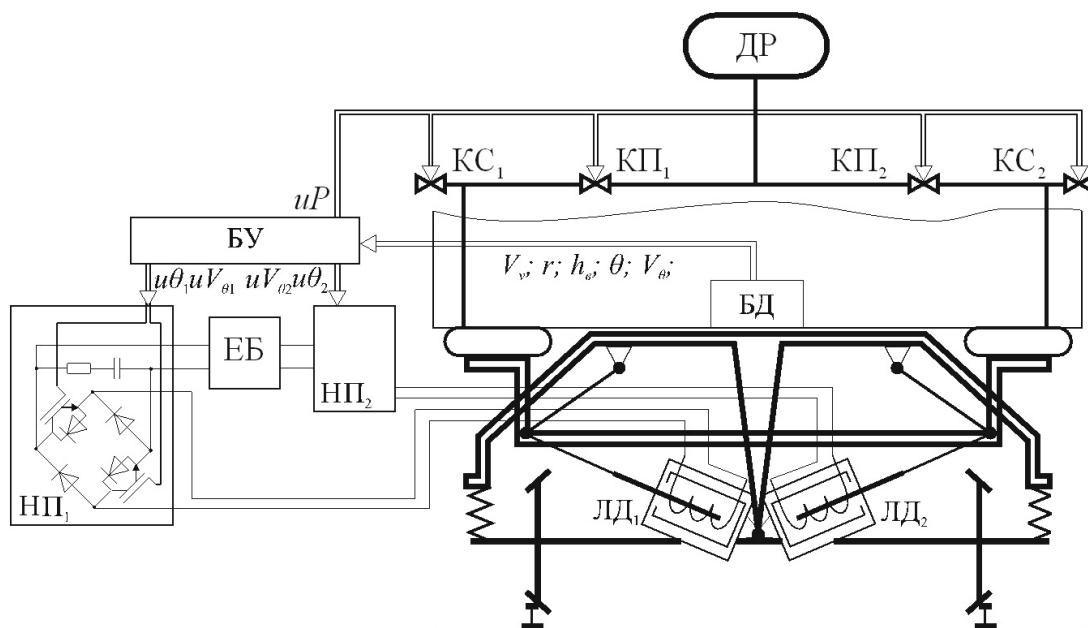


Рис. 1. Схема комбінованого механізму нахилу кузова

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.

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 [27, 28]. Робочі параметри і характеристики електромагнітного двигуна (сила втягування якоря, індуктивність і протиЕРС – залежно від проміжку і струму) задаються шляхом апроксимації залежностей, отриманих експериментально за допомогою імітаційного моделювання в середовищі FEMM [29], поліномами Чебишева на безлічі рівновіддалених точок. Вказані апроксимації залежностей реалізовані у вигляді S – функцій і підключені до моделі [2, 3, 23].

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 пневматичне підвішування, що працює в режимі нахилу кузова.

Ураховуючи наявність двох електромеханічних частин та двох пневморесор, диференційно-алгебраїчна система рівнянь, що визначає узагальнену математичну модель електромеханічної частини механізму нахилу, які наведено у [18, 19], остаточно, набуває вигляду:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_1 - i_1 R_1 - K_{31} V_{T1}}{L_1},$$

$$\frac{dN_1}{dt} = V_{T1},$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{U_2 - i_2 R_2 - K_{32} V_{T2}}{L_2},$$

$$\frac{dN_2}{dt} = V_{T2},$$

$$\frac{dv_1}{dt} = \left((p_1 - p_a) F_{e1} - P_1 - \frac{n p_1 F_{e1}^2}{V_{start1} + x_1 \Delta V_1} x_1 - \frac{0,126 F_{e1}^2 g}{f_{s1}^3} \frac{p_1}{RT_{M1}} v_1 \right) / m_1,$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{k \mu_1 f_1 K_{pM} \sqrt{RT_{M1}}}{F_{e1} (x_{01} + x_1)} \phi(\sigma_1) - \frac{k p_1}{(x_{01} + x_1)} v_1,$$

$$\frac{dx_1}{dt} = v_1,$$

$$\frac{dv_2}{dt} = \left((p_2 - p_a) F_{e2} - P_2 - \frac{n p_2 F_{e2}^2}{V_{start2} + x_2 \Delta V_2} x_2 - \frac{0,126 F_{e2}^2 g}{f_{s2}^3} \frac{p_2}{RT_{M2}} v_2 \right) / m_2,$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{k \mu_2 f_2 K_{pM} \sqrt{RT_{M2}}}{F_{e2} (x_{02} + x_2)} \phi(\sigma_2) - \frac{k p_2}{(x_{02} + x_2)} v_2,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = v_2, \tag{1}$$

$$\frac{dU_{Cd1}}{dt} = \frac{i_{d1}}{C_{d1}},$$

$$\frac{dU_{Cd2}}{dt} = \frac{i_{d2}}{C_{d2}},$$

$$-U_{uc} + i_{d1} R_{d1} + U_{Cd1} = 0,$$

$$-U_{uc} + i_{VT1} R_{VT1} + U_1 + i_{VT1} R_{VT1} = 0,$$

$$i_{d1} R_{d1} + U_{Cd1} + i_{VD21} R_{VD21} + U_1 + i_{VD11} R_{VD11} = 0,$$

$$i_{VT1} R_{VT1} + U_1 + i_{VD11} R_{VD11} = 0,$$

$$i_{uc1} + i_{VD11} - i_{VT1} - i_{d1} = 0,$$

$$-i_{uc1} - i_{VD21} + i_{VT21} + i_{d1} = 0,$$

$$i_{VT1} + i_{VD21} - i_1 = 0,$$

$$-U_{uc} + i_{d2} R_{d2} + U_{Cd2} = 0,$$

$$-U_{uc} + i_{VT2} R_{VT2} + U_2 + i_{VT2} R_{VT2} = 0,$$

$$i_{d2} R_{d2} + U_{Cd2} + i_{VD22} R_{VD22} + U_2 + i_{VD12} R_{VD12} = 0,$$

$$i_{VT2} R_{VT2} + U_2 + i_{VD12} R_{VD12} = 0,$$

$$i_{uc2} + i_{VD12} - i_{VT2} - i_{d2} = 0,$$

$$-i_{uc2} - i_{VD22} + i_{VT22} + i_{d2} = 0,$$

$$i_{VT2} + i_{VD22} - i_2 = 0,$$

$$i_{uc} = i_{uc1} + i_{uc2},$$

$$\theta = f(x_1, x_2, N_1, N_2),$$

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; $i_{VD1,1,2}$, $i_{VD2,1,2}$ – струми діодів VD1, VD2 першого та другого двигунів відповідно; $i_{VT1,1,2}$, $i_{VT2,1,2}$ – струми ключів VT1, VT2 першого та другого двигунів відповідно; $i_{d1,2}$ – струми демпфуючих кіл; $i_1,2$ – струми живлення лінійних двигунів; $R_{d1,2}$ – обмежуючий опір демпфуючого кола лінійних двигунів; $R_{VT1,2}$ – опір обмоток лінійних двигунів; $R_{VD1,2}$ – ємності демпфуючих кіл; $L_{1,2}$ – індуктивності лінійних двигунів; K_{31} , K_{32} – коефіцієнти при протиЕРС 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 адиабати; μ – коефіцієнт витрати, $f_{1,2}$ – площа входних 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 днів пневморесор; $F_{1,2}$ – ефективні площі пневморесор; $V_{start1,2}$ – сумарний початковий об’єм порожньої частини пневморесор та додаткових резервуарів; $\phi(\sigma)$ – 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; $R_{1,2}$ – результуюча усіх сил, що здійснюють тиск на пневморесори 1 та 2 відповідно; $f(x_1, x_2, N_1, N_2)$ – функція, що визначає сумарний кут нахилу механізму; n – показник політропи; $\Delta V_{1,2}$ – питоме зміння об’єму 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 нахилиється, а також роботу керованого пневматичного підвищення. Вона дозволяє досліджувати геометричні, силові та електрофізичні параметри у часі. Особливістю цієї моделі є застосування методу кінцевих елементів для ідентифікації параметрів лінійного двигуна, а також визначення параметрів пневморесори за допомогою витратної функції [22, 23].

5. Імітаційна модель механізму нахилу кузова

Вирішення математичних моделей здійснювалося за допомогою імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink [25, 27, 28], що дозволяє ефективніше організувати процес дослідження електромеханічної та пневматичної системи, виключивши з нього етап формування системи диференціальних рівнянь у вигляді задачі Коші та написання процедур числового інтегрування; підходи блокового моделювання дозволяють легко змінювати структуру і конфігурацію системи без «переписування» початкової системи диференціальних рівнянь.

Блок-схема загальної моделі представлена на рис. 2.

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

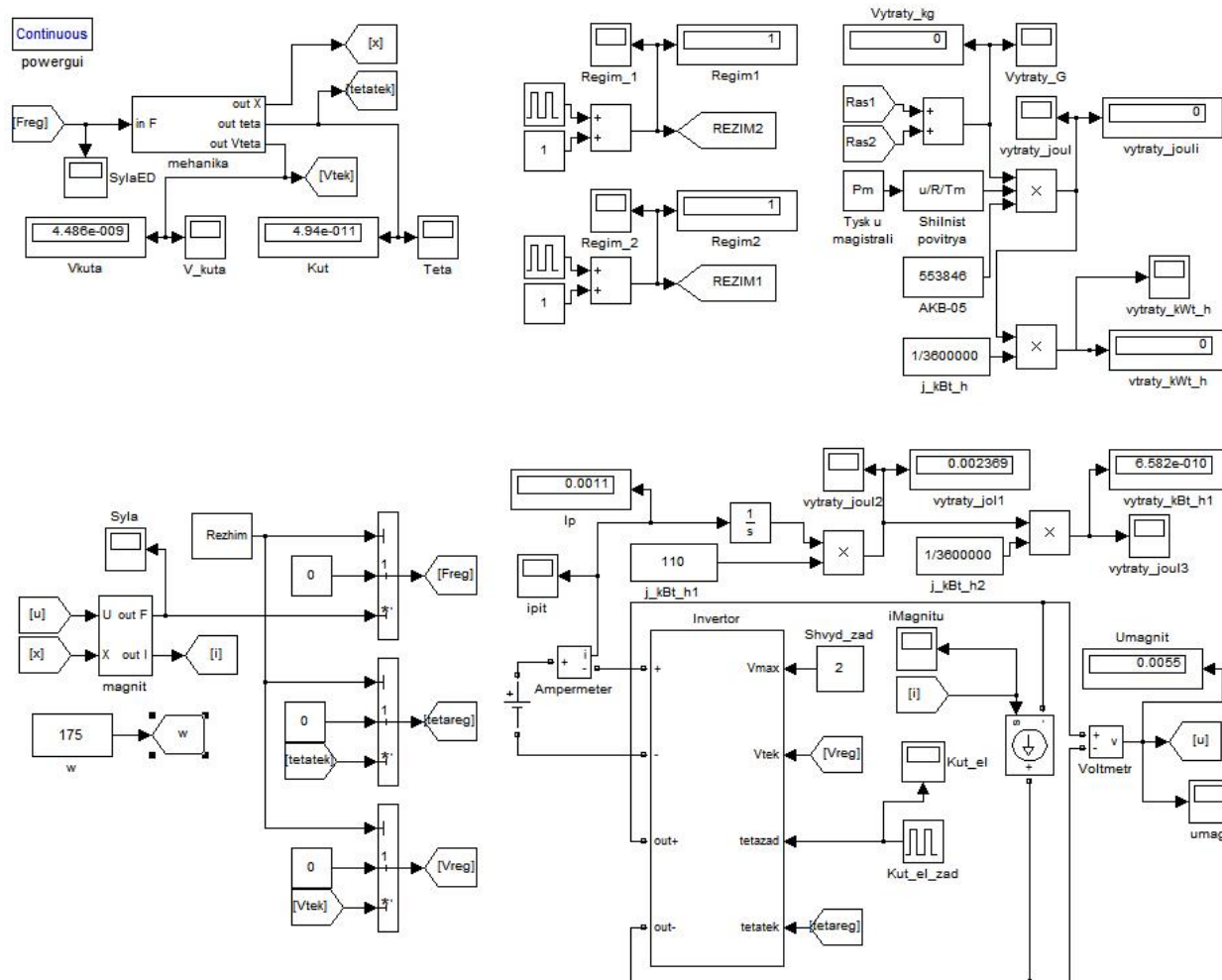


Рис. 2. Блок-схема загальної моделі системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу

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 реалізується 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 i лінійного двигуна.

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.

Блок-схема підсистеми моделювання механічної частини mehanika, приведена на рис. 3.

Триланковий механізм нахилу представлений за допомогою системи абсолютно жорстких тіл VagilL, VagilR і Balka, сполучених за допомогою шарнірів, що забезпечують один ступінь свободи, – обертання навколо осі, перпендикулярної площині механізму. Моментами тертя в них нехтуємо. «Земля» механізму є рамою візка. Тіла VagilL і VagilR імітують здвоєні важелі підвісу балки, що нахилиється. Тіло Balka моделює балку, що нахилиється навантаженою частиною ваги кузова екіпажа, що доводиться на один привід механізму нахилу.

На відміну від попередніх реалізацій [2, 3], пропонується модель містить тіло Kuzov, що імітує кузов швидкісного потягу, який спирається на балку, що нахилиється, за допомогою двох пневматичних ресор, представлених підсистемами ResoraL та ResoraR. Блок-схема моделі пневматичної ресори наведена на рис. 4.

Механічна частина пневматичних ресор у наведеній моделі представлена двома тілами DnoV та DnoN, геометричні та фізичні параметри котрих відповідають верхньому та нижньому днищам. Між собою днища сполучені призматичним шарніром, який дозволяє лише один ступінь свободи – тіла можуть лише віддалятися та сходиться.

Matlab-функції Fp , Fk та Fc описують праву частину першого і третього рівняння (1) та відображають складові сили, що діють на верхню частину пневморесори.

Складові сили Fp та Fc використовують у якості аргументу тиск у превморесорі.

Його визначення у пневматичній ресорі залежно від взаємного положення її днищ, а також режимів її роботи, виконується підсистемою VarP, блок-схема якої наведена на рис. 5.

Ця підсистема складається з Matlab-функції dP , яка відображає праву частину шостого та дев'ятого рівняння системи (1). Розхід повітря визначається Matlab-функцією $Gvoz$. Блоки-селектори визначають режим роботи приводу нахилу:

- режим 1 – робота у шатному режимі ресорного підвішування;
- режим 2 – скидання повітря (опускання пневморесори);
- режим 3 – накачування повітря з магістралі (підйом пневморесори).

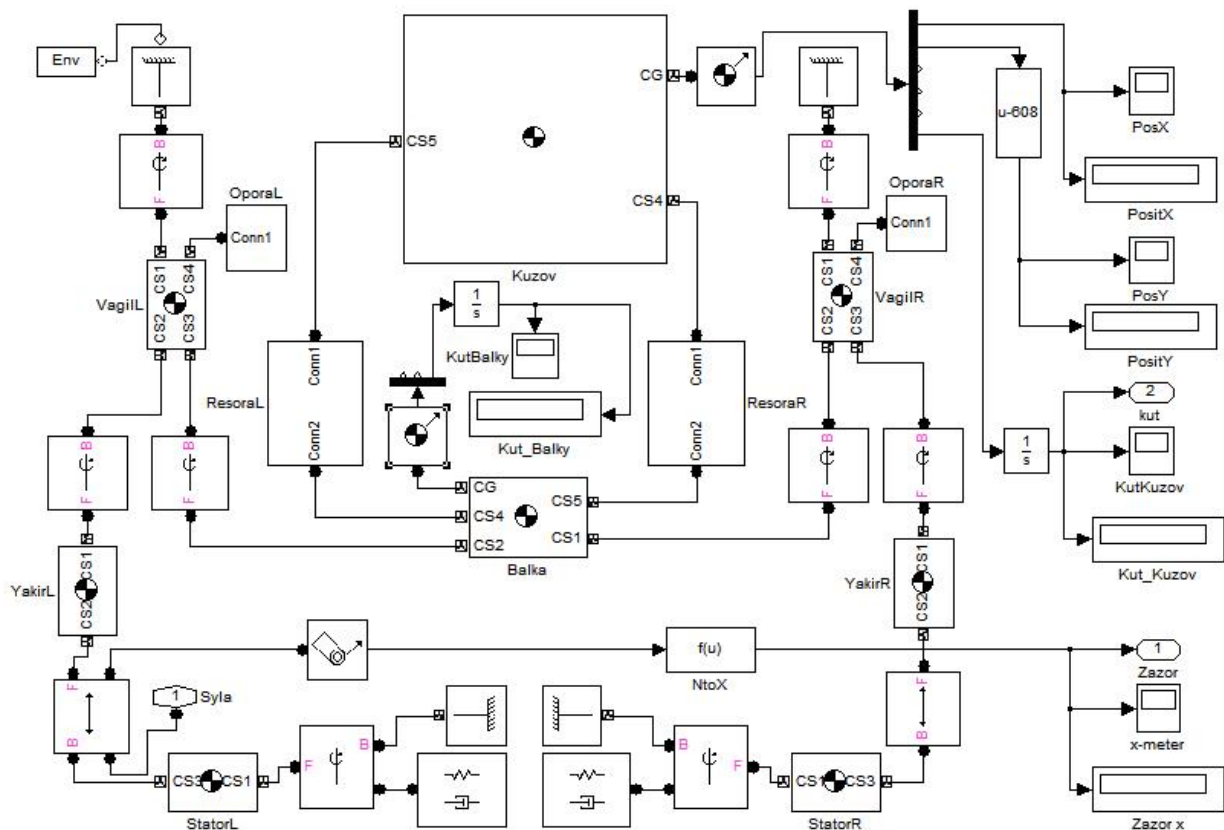


Рис. 3. Блок-схема імітаційної моделі механічної частини

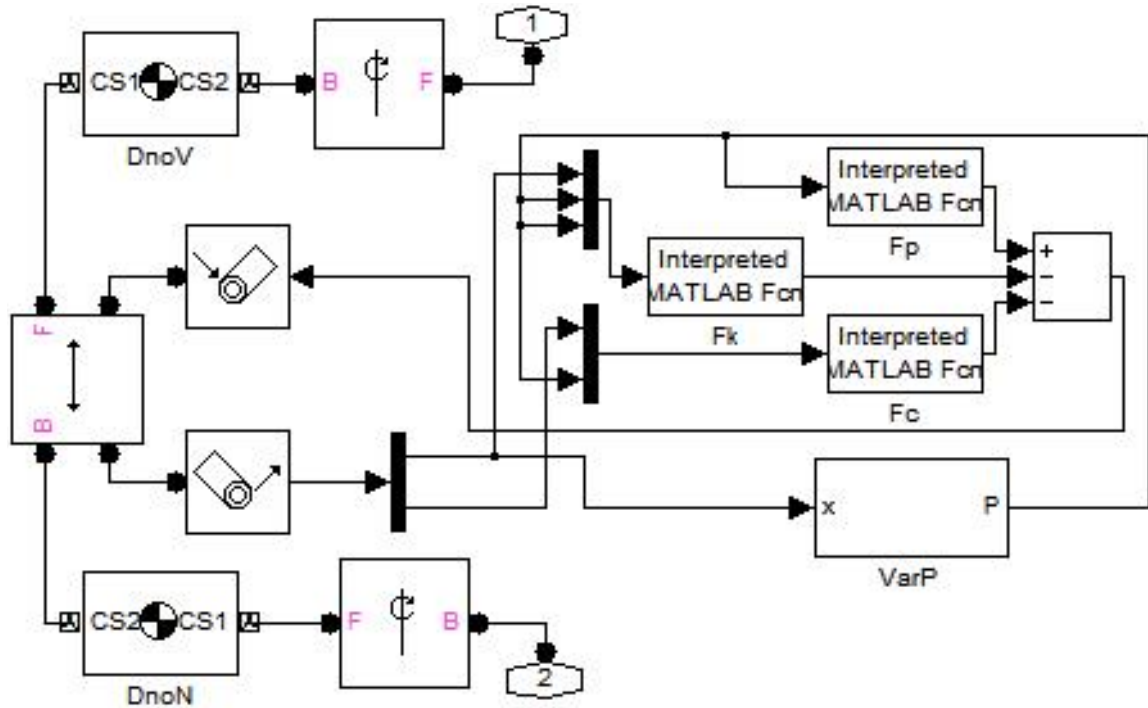


Рис. 4. Блок-схема моделі пневматичної ресори

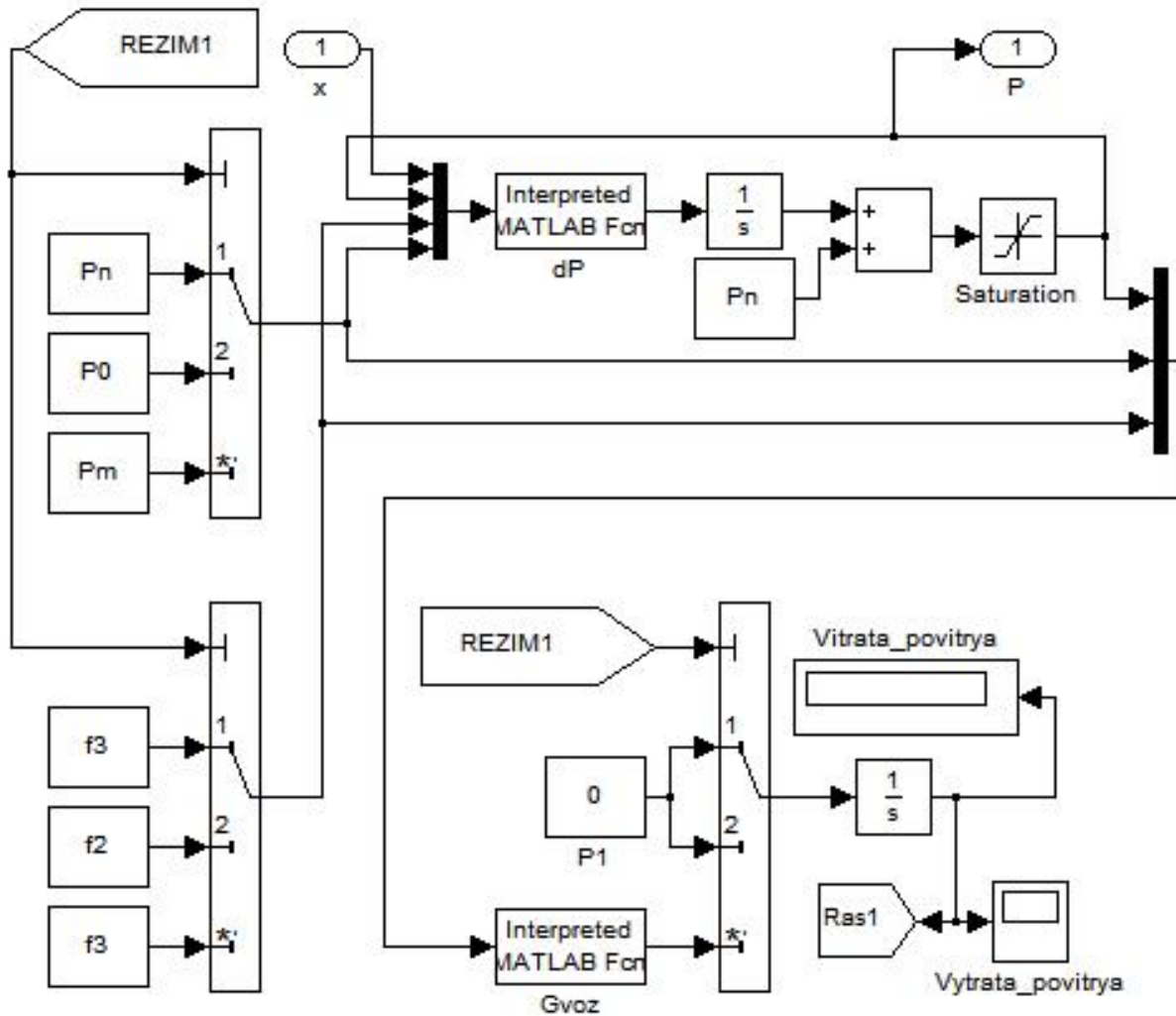


Рис. 5. Блок-схема моделі підсистеми обчислення тиску у пневматичній ресорі

Лінійні двигуни, за допомогою шарнірів, сполучених з їх якорями YakirL та YakirR, приєднані до портів CS2 лівого та CS3 правого важелів підвісу, координатні системи яких співпадають з координатними системами шарнірів підвісу балки. Корпуси електромагнітних двигунів StatorL та StatorR за допомогою шарнірів сполучені з рамою візка. До шарнірів прикладені актуатори, що імітують тертя у шарнірах. Якорі лінійних двигунів сполучені з їх корпусами за допомогою призматичних шарнірів, що забезпечують один ступінь свободи, – лінійне переміщення тіл, що сполучаються, уздовж їх осей. До приводного порту правого електромагнітного двигуна підводиться сила, що забезпечує нахил кузова. У підсистему сила вводиться через РМС – порт Syla.

До центру мас тіла Kuzov, що моделює кузов досліджуваного швидкісного рухомого складу, під'єднаний сенсор, призначення якого – генерація вектору параметрів положення кузова у просторі. З цього вектору за допомогою деміксуючого блоку виділено інформацію щодо кута нахилу кузова. Цей параметр виводиться назовні блоку через вихідний порт kut.

Задля поточного контролю в систему введено низку блоків – осцилоскопів (KutBalky, PosX, PosY, KutKuzov, x-meter) та цифрових дисплеїв (Kut_Balky, PositX, PositY, Kut_Kuzov, ZazorX), що дозволяють контролювати зміну показників роботи механізму як підчас моделювання, так і після завершення розрахунку. Блок функції NtoX переводить отриману величину в міліметри та забезпечує наявність мінімального проміжку не менш 0,1 мм.

Фізичні параметри вказаних тіл – координати вузлових точок, центрів тяжіння і моменти інерції отримані з твердотілих моделей відповідних компонентів, побудованих в середовищі тривимірного моделювання. Розташування центру мас кузова відповідає розташуванню «середнього» центру мас кузова екіпажу, отриманому шляхом порівняння цього параметра у декількох типів потягів з кузовами, що нахилиються [2].

З метою обмеження кута нахилу балки система оснащена упорами OporaL і OporaR, що є двоплечими важелями, шарнірно сполученими один з одним, а також з важелями підвісу та рамою візка.

Блок-схема підсистеми моделювання лінійного двигуна magnit, приведена на рис. 6.

Задля пониження порядку імітаційної моделі, в ній наведено блок-схему лише одного лінійного двигуна та його напівпровідникового перетворювача. Оскільки одночасна робота двох лінійних двигунів не розглядається, модель підчас роботи імітує дію лише одного двигуна (ЛД1) в режимі нахилу за часовою стрілкою, а проти часової стрілки – іншого (ЛД2).

Значення робочого проміжку в електромагнітному двигуні, що поступає на зовнішній порт x підсистеми, диференціюється за часом, формуючи таким чином значення швидкості переміщення якоря. Добуток значення струму через обмотку лінійного двигуна і кількості витків його котушки, являє собою магніторухійну силу (МРС), і є вхідним вектором для апроксимуючих функцій infun, що є поточними значеннями проміжку між якорем електромагнітного двигуна і упором статора, а також струму і в обмотці, помноженого на кількість її витків.

Вектор даних подається на вхід блоку AproxF, що є функцією апроксимації електромеханічної сили, написаною на мові Matlab і викликається із зовнішнього m-файлу, що підключається. Отримане значення сили виводиться на зовнішній порт outF підсистеми.

Значення напруги, що подається на обмотку лінійного двигуна електромагнітного типу, поступає із зовнішнього порту U підсистеми. З цього сигналу віднімається добуток струму та опору обмотки R, що є падінням напруги на активному опорі котушки електромагнітного двигуна.

Вектор даних infun подається на вхід блоку AproxProtyERS, що є функцією апроксимації проти ЕРС електромагнітного двигуна.

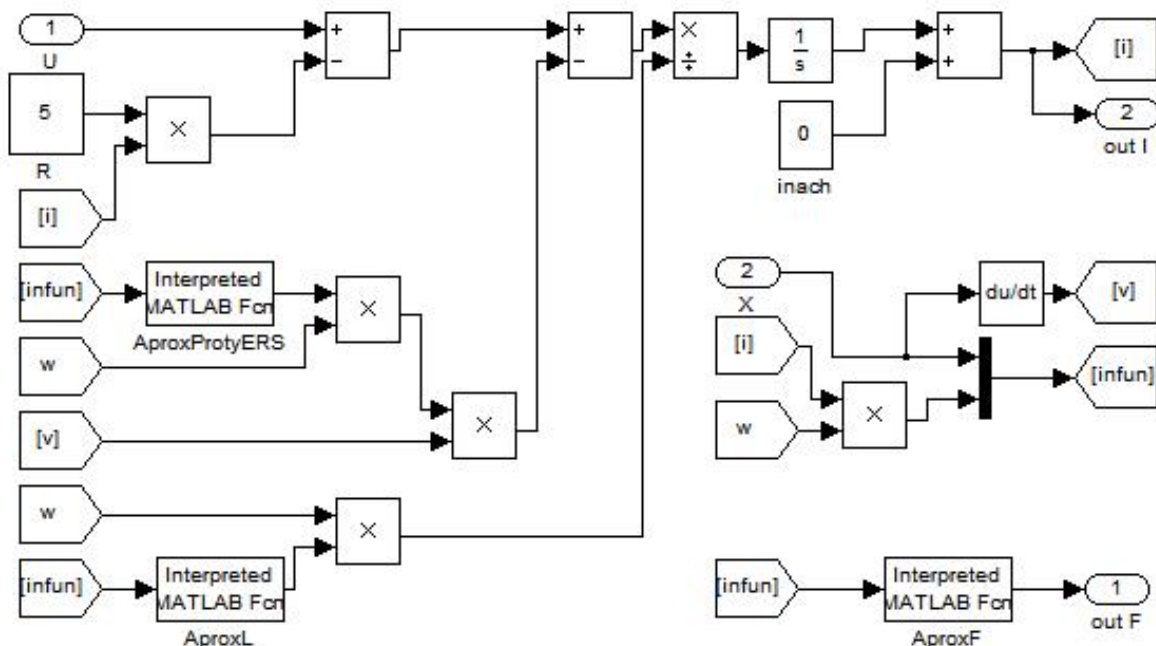


Рис. 6. Блок-схема моделі лінійного двигуна електромагнітного типу

Її вихідне значення множиться на кількість витків, отриманий добуток множиться на значення швидкості переміщення якоря. Отриманий сигнал віднімається з поточного значення напруги, отриманої вище. Далі відбувається ділення поточного значення сигналу на величину індукції, отриманої шляхом подання вектору даних *infun* на вхід апроксимуючої функції *AproxL*, помноженої на кількість витків.

Для визначення функцій *AproxF*, *AproxProtuERS* і *AproxL* потрібне проведення комплексу цифрових експериментів, що включають розрахунок тягових характеристик досліджуваного лінійного двигуна електромагнітного типу при різних струмах і подальша апроксимація результатів поліноміальними функціями [2, 3, 23].

Блоки моделювання лінійного електромагнітного двигуна і механічної частини сполучені за допомогою допоміжної підсистеми «*mehnika*», представленої на рис. 7.

Вхідним сигналом підсистеми виступає значення електромеханічної сили, що подається на порт *in F*. Ця величина інвертується для отримання необхідного знаку вектору сили, зумовленого роботою лінійного двигуна на втягування якоря. Отримане значення по-

дається на блок механічного приводу, що перетворює вхідний сигнал в механічну силу, що подається на РМС-порт *Syla* підсистеми *Mekhanizm*. Вихідні параметри вказаної підсистеми *zazor* і *kut* передаються відповідно на зовнішні порти підсистеми *outX* і *outteta*. Швидкість нахилу обчислюється шляхом диференціювання кута нахилу за часом і подається на порт *outVteta*.

Перетворювач включає підсистему *Invertor*, блок-схема імітаційної моделі якої представлена на рис. 8. Він є прямоходовим інвертором.

Джерело напруги живлення підключене до портів + і - підсистеми інвертора. До них же підключений демпфуючий RC ланцюжок *filtr* та мостова схема, плечі якої є діодами *VD1* та *VD2* і керованими ключами *VT1* та *VT2*.

Схеми, що управляють ключами, представлені у вигляді суматорів, що обчислюють різницю між поточним і зразковим значенням контрольованого параметра. Виходи суматорів підключені до блоків релейних функцій, що вносять затримку в спрацювання ключів, з метою запобігання реакції системи на короточасні зміни контрольованих сигналів. Вхідні сигнали наводяться до виду, потрібного для управління ключами *VT1* та *VT2*.

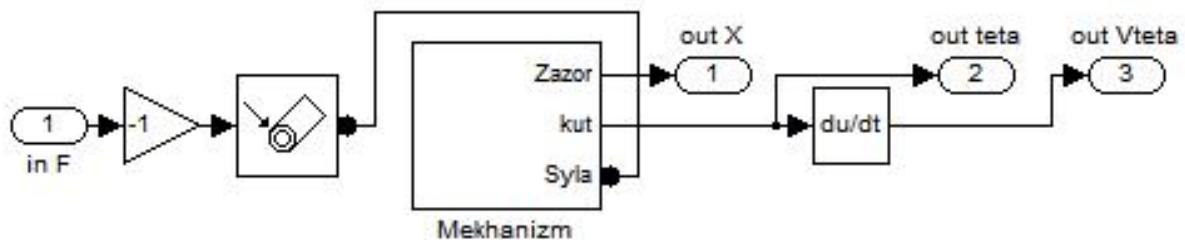


Рис. 7. Блок-схема допоміжної підсистеми

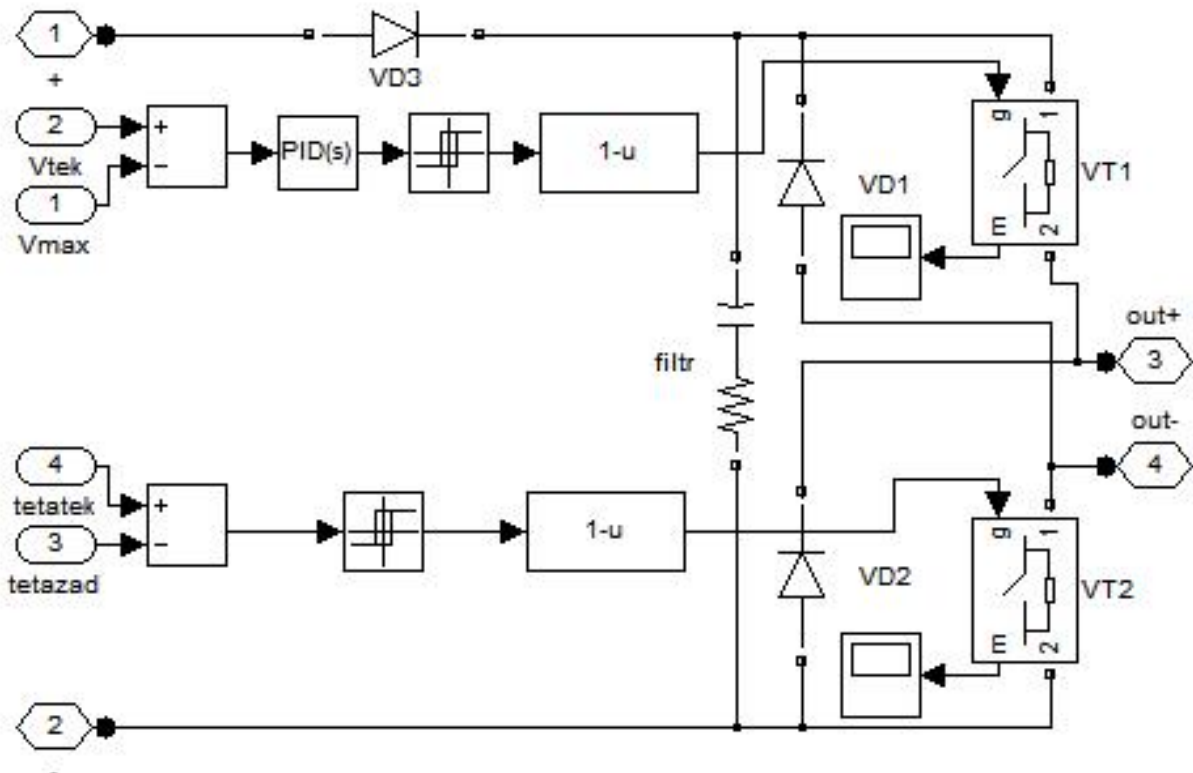


Рис. 8. Блок-схема моделі інвертора

В якості контрольованого і зразкового сигналів, що управляють роботою ключа VT1, використовуються значення поточної швидкості нахилу кузова та її граничного значення, обумовленого комфортом пасажирів. Ці сигнали поступають із зовнішніх портів Vtek та Vmax підсистеми відповідно.

Роботою ключа VT2 управляють сигнали, що поступають із зовнішніх портів tetatek та tetazad підсистеми і є вимірним значенням кута нахилу кузова та його заданою величиною.

Навантаженням інвертора, що підключається до портів out+ та out-, є кероване джерело струму, що моделює роботу лінійного двигуна в електричному колі та наведена на рис. 2. На його вхід s, що управляє, подається поточне значення струму, отримане в результаті роботи підсистеми magnit.

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 кута нахилу кузова.

6. 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°. Моделювання проводилось при заданій швидкості нахилу 2°/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. 9–22.

Таким чином, в результаті моделювання доведено працездатність моделі запропонованої системи нахилу кузовів.

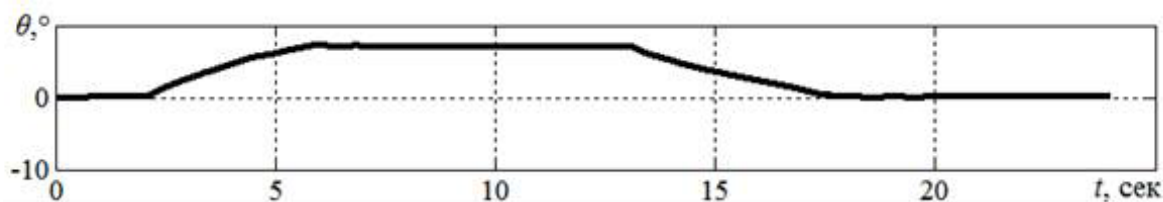


Рис. 9. Залежність загального кута нахилу (θ) кузова від часу (t)

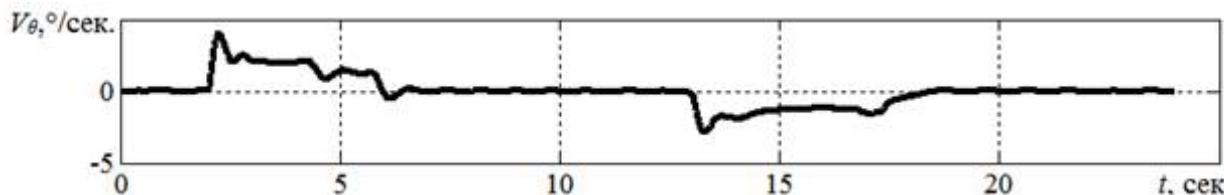


Рис. 10. Залежність загальної швидкості нахилу (V_{θ}) кузова від часу (t)

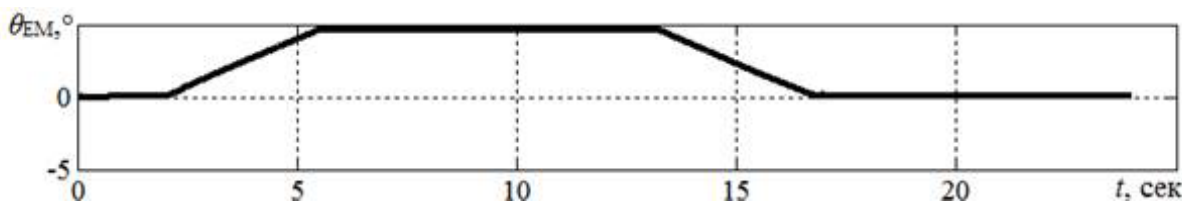


Рис. 11. Залежність кута нахилу проміжної балки (θ_{EM}), реалізованого лінійними двигунами, від часу (t)

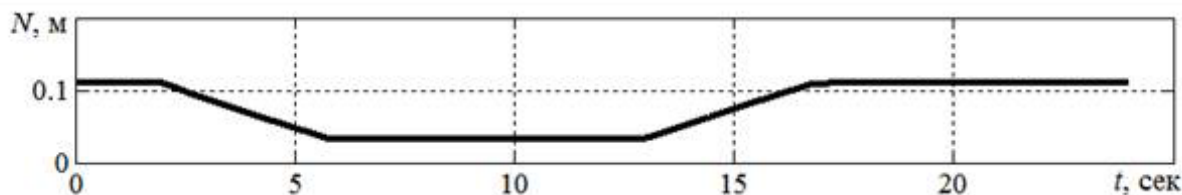


Рис. 12. Залежність робочого зазору (N) лінійного двигуна від часу (t)



Рис. 13. Залежність заданого кута нахилу кузова (θ_n) від часу (t)

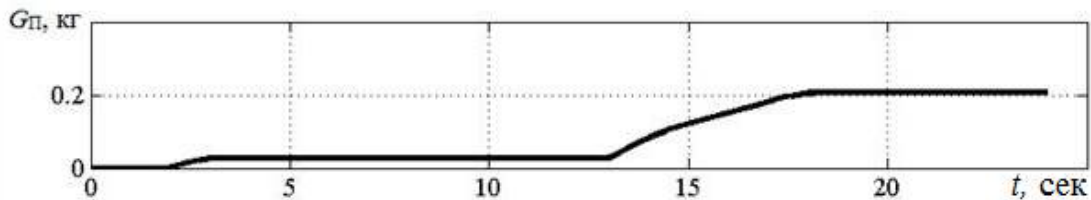


Рис. 14. Залежність вагової витрати повітря (G_n) від часу (t)

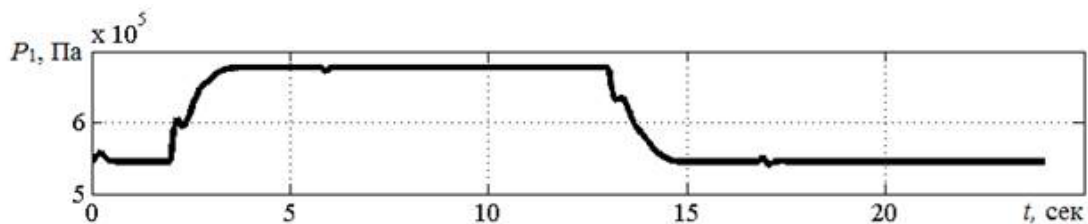


Рис. 15. Залежність тиску у першій пневморесорі (P_1) від часу (t)

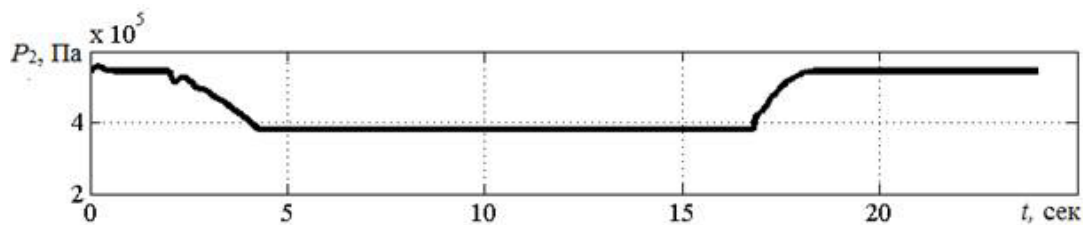


Рис. 16. Залежність тиску у другій пневморесорі (P_2) від часу (t)

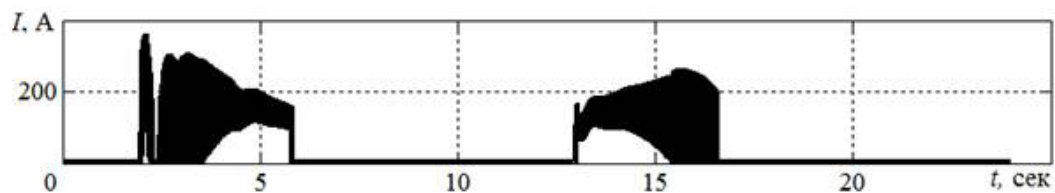


Рис. 17. Залежність струму лінійного двигуна (I) від часу (t)

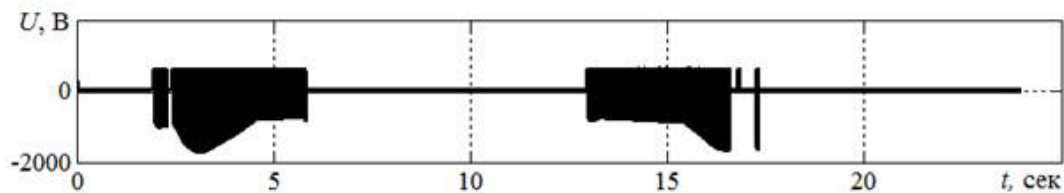


Рис. 18. Залежність напруги лінійного двигуна (U) від часу (t)

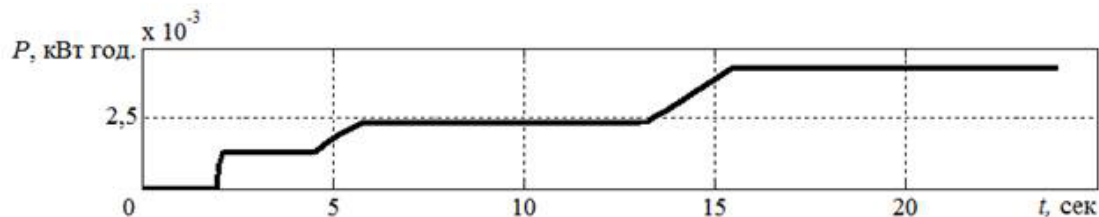


Рис. 19. Залежність витрат енергії лінійних двигунів (P) від часу (t)

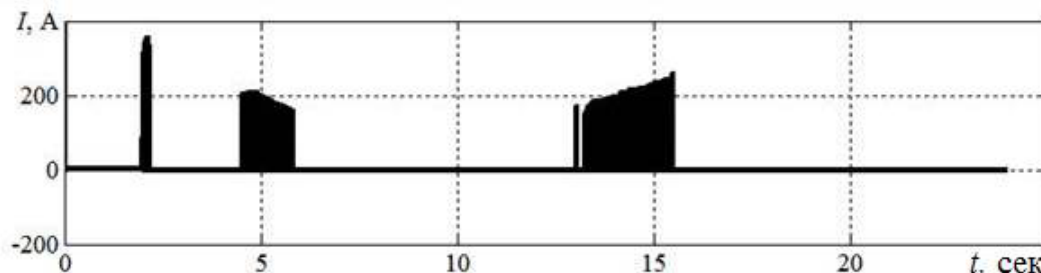


Рис. 20. Залежність струму, що притикає у джерелі живлення напівпровідникового перетворювача (I) від часу (t)

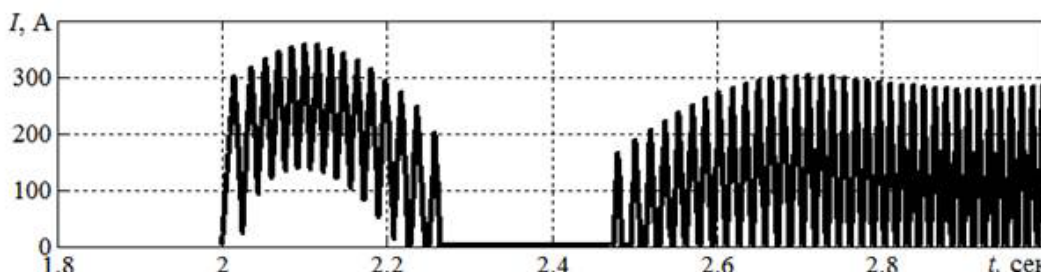


Рис. 21. Фрагмент залежності струму лінійного двигуна (I) від часу (t)

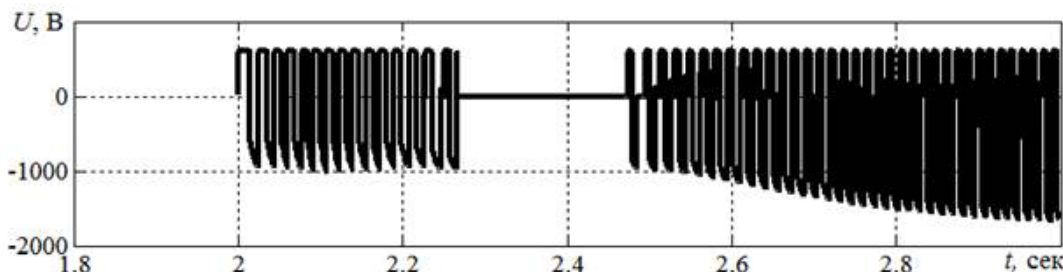


Рис. 22. Фрагмент залежності напруги ЛД1 (U) від часу (t)

7. Обговорення результатів моделювання роботи системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу

Процес нахилу кузова починається на 2 сек. Він супроводжується ростом швидкості нахилу кузова до максимального значення короткочасно до 3,7°/сек., що обумовлено одночасною роботою обох систем нахилу та інерційністю кузова (рис. 10). При цьому швидкість електромеханічної системи не перевищує 1,3°/сек. (рис. 9). Далі швидкість стабілізується на заданому рівні від 1,8°/сек. до 2,1°/сек., що обумовлено сумісною роботою обох складових системи нахилу кузова (рис. 10). Найбільший вплив на швидкість на початку руху має пневматична система, оскільки, у той час коли відносний тиск у обох пневморесорах мінімальний, функція розходу має надкритичне максимальне значення, що обумовлює максимальне змінення тиску у пневморесорах (рис. 15, 16). Близько 4,7 сек. спостерігається зменшення швидкості до 1,1°/сек. (рис. 10), що обумовлено відключенням пневматичної системи нахилу у зв'язку з досягненням заданого рівня тиску в обох пневморесорах (рис. 15, 16). З 5 сек. по 5,8 сек. швидкість підтримується на рівні 1,1 до 1,3°/сек. (рис. 10) – електрична складова приводу нахилу працює окремо.

Кут нахилу зростає відповідно швидкості з 2 по 6 сек. З 5,8 до 6 сек. спостерігається незначне перерегулювання системи до 0,2° та подальший коливальний

процес зупинки нахилу, що закінчується до 7 сек. за 1,5 періоду коливань (рис. 10).

Тиск у пневморесорі, що наповнюється (рис. 15), зростає з 2 сек. по 3,5 сек. з 0,545 МПа до 0,677 МПа, а у пневморесорі, що стравлюється у повітря, зменшується з 2 сек. по 4,7 сек. з 0,545 МПа до 0,38 МПа (рис. 16). Близько 2,2 сек. спостерігається зменшення швидкості росту тиску у пневморесорі, що наповнюється, та різке збільшення швидкості стравлення у іншій, що обумовлено інерційністю кузова (рис. 16).

Напряга на обмотці якоря має пульсуючий характер, зумовлений дією системи керування (рис. 18, 22). Додатна частина імпульсу, що обмежена напругою джерела живлення, складає 600 В. Від'ємна частина, що обумовлена дією протиЕРС обмотки двигуна, обумовлена рівнем індуктивності, що зростає з рухом якоря лінійного двигуна при нахилі, та тривалістю імпульсу, який обумовлено надлишком електромагнітної сили над гравітаційною силою опору самоповернення. Таким чином, на початку руху ці дві складові найбільші, тому від'ємні імпульси напруги складають максимального рівня близько 1650 В біля 3,2 сек. Вони знижуються до 740 В до 5,8 сек. руху (рис. 18, 22).

Струм лінійного двигуна змінюється за пилоподібним законом з амплітудою близько 270 А (рис. 17, 21), що має постійну складову яка зростає з 2 сек. до 2,1 сек. Перша складова обумовлена процесом наростання струму при заряді (лівий фронт) та розряді

(правий фронт) індуктивності обмотки лінійного двигуна. Постійна складова обумовлена дією протиЕРС обмотки двигуна. Вона зростає з 2 сек. до 2,1 сек. у момент початку руху. Далі швидкість починає обмежуватися, тому постійна складова знижується. З 2,26 сек. до 2,45 сек. спостерігається вимкнення електричного приводу нахилу (напруга та струм дорівнюють нулю), що обумовлено максимальною швидкістю нахилу пневматичного приводу. Протягом руху змінна складова зменшується до 53 А близько 5,8 сек., а постійна зростає до 125 А. Це обумовлено ростом індуктивності обмотки лінійного двигуна зі зменшенням робочого зазору.

Процес повертання кузова у вихідне положення розпочинається на 13 сек. та закінчується близько 18,5 сек. (рис. 9). Крива зміни швидкості носить характер, аналогічній кривій при нахилі, але з від'ємним знаком, тому як обумовлена таким ж процесами. Перерегулювання становить $0,05^\circ$ (рис. 9), що значно менше ніж при нахилі, це обумовлено меншими значеннями сил, як електромагнітних так і опору при початковому положенні кузова.

Криві струму та напруги лінійного двигуна (рис. 17, 18) при повертання механізму у вихідне положення близькі до кривих при нахилі, але характер їх змін проходить у зворотному порядку. Також на них оказує вплив сила ваги кузова, яка діє у зворотному русі.

Розхід повітря при нахилі кузова обумовлено лише роботою пневморесори, що наповнюється (рис. 14). Інша пневморесора стравлює повітря у атмосферу. Рівень розходу обумовлюється відносним тиском (чим він менший тим більший розхід повітря). Втрати повітря на нахил значно менші 0,026 кг за втрат повітря на повертання кузова у вихідне положення, які становлять 0,181 кг.

Струм джерела живлення носить імпульсний характер (рис. 20). Максимальне значення досягає 360 А, на 2,1 сек. Тривалість імпульсів лежить в межах 0,03 сек. до 0,15 сек. Найбільша вона на початку процесу нахилу. Кількість імпульсів обумовлюється різницею сил тяги та опору повернення.

Загальні витрати енергії електричної частини приводу нахилу за весь цикл роботи становить 1,318 кДж (рис. 19), сумарний розхід повітря пневматичної частини 0,208 кг (рис. 17).

8. 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 нахилиється, 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 пневморесор за допомогою витратної функції.

В зв'язку з тим, що пряме рішення системи рівнянь спільно з іншими складовими приводу є досить складним і громіздким завданням, пропонується для моделювання механічної частині приводу нахилу використати середовище MATLAB Simulink і його складову SimMechanics.

Розроблена імітаційна модель процесів електро-механічного перетворення енергії в системі нахилу кузовів, яка дозволяє досліджувати залежність змін параметрів системи нахилу кузова (кут нахилу кузова, струм та напруга на ділянках напівпровідникового перетворювача, хід якоря двигуна, хід пневморесор, зміна тиску у пневморесорах) та енергетичних параметрів механізму (втрати енергії на нахил кузова електричного та пневматичного приводів, розхід повітря) у часі.

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.

2. Знайдені основні залежності енергетичних показників приводу нахилу кузова. Наразі встановлено наступне.

Процес нахилу кузова супроводжується ростом швидкості нахилу кузова до максимального значення короткочасно до $3,7^\circ/\text{сек.}$, що обумовлено одночасною роботою обох систем нахилу та інерційністю кузова. При цьому швидкість електромеханічної системи не перевищує $1,3^\circ/\text{сек.}$ Далі швидкість стабілізується на заданому рівні від $1,8^\circ/\text{сек.}$ до $2,1^\circ/\text{сек.}$, що обумовлено сумісною роботою обох складових системи нахилу кузова. Найбільший вплив на швидкість має на початку руху пневматична система.

Щодо кута нахилу, спостерігається незначне перерегулювання системи до $0,2^\circ$ та подальший коливальний процес зупинки нахилу, що закінчується за 1,5 періоду коливаний.

Тиск у пневморесорі, що наповнюється, зростає протягом 1,5 сек. з 0,545 МПа до 0,677 МПа, а у пневморесорі, що стравлює повітря, зменшується протягом 2,7 сек. з 0,545 МПа до 0,38 МПа.

Напруга на обмотці якоря має пульсуючий характер, що зумовлено дією системи керування. Додатна частина імпульсу, що обмежена напругою джерела живлення, складає 600 В. Від'ємна частина, що обумовлена дією протиЕРС обмотки, залежна від рівню індуктивності, що зростає із рухом лінійного двигуна при нахилі, та тривалості імпульсу, який визначено надлишком електромагнітної сили над силою повертання.

Струм лінійного двигуна змінюється за пилоподібним законом, з амплітудою близько 270 А, що має постійну складову, яка зростає протягом 0,1 сек. на початку руху. Перша складова обумовлена процесом наростання струму при заряді (лівий фронт) та розряді (правий фронт) індуктивності обмотки лінійного двигуна. Постійна складова обумовлена дією проти ЕРС обмотки двигуна. Далі швидкість починає обмежуватися, тому постійна складова знижується. З 2,26 сек. по 2,45 сек. спостерігається вимкнення електричного приводу нахилу (напруга та струм дорівнюють нулю), що обумовлено максимальною швидкістю нахилу пневматичного приводу. Протягом руху змінна складова зменшується до 53 А на 5,8 сек., а постійна зростає до 125 А.

Процес повертання кузова у вихідне положення розпочинається о 13 сек. та закінчується близько 18,5 сек. Крива зміни швидкості носить характер, аналогічній кривій при нахилі, але з від'ємним знаком, оскільки обумовлена такими ж процесами. Перерегулювання становить 0,05°, що значно менше ніж при нахилі, це обумовлено меншими значеннями сил, як електромагнітних так і опору при початковому положенні кузова.

Криві струму та напруги лінійного двигуна при повертанні у вихідне положення близькі до кривих при нахилі, але характер їх змін проходить у зворотному порядку. Також на них чинить вплив сила ваги кузова, яка діє у зворотному русі.

Втрати повітря на нахил значно менші (0,026 кг) за втрати повітря на повертання кузова у вихідне положення (0,181 кг), що обумовлено різними значеннями відносного тиску у цих режимах.

Струм джерела живлення носить імпульсний характер з максимальним значенням до 360 А. Тривалість імпульсів лежить в межах від 0,03 сек. до 0,15 сек. Найбільша вона на початку процесу нахилу. Кількість імпульсів обумовлюється різницею сил тяги та опору повертання.

Загальні витрати енергії електричної частини приводу нахилу за весь цикл роботи становлять 1,318 кДж, сумарний розхід повітря пневматичної частини 0,208 кг.

На підставі отриманих залежностей можливо обрати елементну базу напівпровідникового перетворювача (типи ключів та діодів), параметри та типи балонів пневморесор, а також визначитися з навантаженнями елементів надвізкової будови рухомого складу.

Отримані результати можливо використати при розробці та проектуванні швидкісного рухомого складу залізниць без суттєвої реконструкції існуючої транспортної інфраструктури.

Література

1. Корниенко, В. В. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт [Текст] / 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 скоростного подвижного состава [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д. И. Якунин. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2010. – 202 с.
3. Любарський Б. Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу [Текст]: дис. ... д-р техн. наук / Б. Г. Любарський. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2014. – 368 с.
4. Развитие технологии наклона кузовов вагонов [Текст] // Железные дороги мира. – 2001. – № 11. – С. 8–16.
5. Garicoix, M. Talgo company in the domestic and foreign markets [Text] / M. Garicoix // La Vie du Rail. – 2008. – Vol. 3173. – P. 20–25.
6. Kottenhahn, V. Rolling stock to eliminate the gaps in the high-speed network – tilting trains in Germany [Text] / V. Kottenhahn // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 1998. – Vol. 212, Issue 1. – P. 85–102. doi: 10.1243/0954409981530706
7. Janicki, J. The development of high-speed transport [Text] / J. Janicki // Deine Bahn. – 2005. – Vol. 9. – P. 555–562.
8. Oriol, M. Universal high-speed train for Spain's rail road's [Text] / M. Oriol // European Railway Review. – 2008. – Vol. 3. – P. 87–91.
9. Michell, M. Building a railway for the 21st century: bringing high speed rail a step closer [Text] / M. Michell, S. Martin, P. Laird // Conference on Railway Excellence, Proceedings, 2014. – P. 612–621.
10. McIntosh, J. Why Fast Trains Work: An Assessment of a Fast Regional Rail System in Perth, Australia [Text] / J. McIntosh, P. Newman, G. Glazebrook // Journal of Transportation Technologies. – 2013. – Vol. 3, Issue 2. – P. 37–47. doi: 10.4236/jtts.2013.32a005
11. Smith, R. A. Background of recent developments of passenger railways in China, the UK and other European countries [Text] / R. A. Smith, J. Zhou // Journal of Zhejiang University Science A. – 2014. – Vol. 15, Issue 12. – P. 925–935. doi: 10.1631/jzus.a1400295
12. Luo, R. Dynamic simulation of tilting train controlled by air springs [Text] / R. Luo, J. Zeng // Engineering mechanics. – 2009. – Vol. 26, Issue 3. – P. 240–245.
13. U.S. Patent 5921185, 105/4.1; 105/199.1; 105/199.2. Body-tilt system for articulated vehicles, a vehicle including such a system, and a set of such vehicles [Text] / Hoyon C., Gaignant J.-C., Cros M. – GEC Alstom Transport SA (Paris, FR). – No 08/859,909. – July 13, 1999.
14. Weiss, T. ICN tilting trains will deliver faster and more frequent service [Text] / T. Weiss // Railway Gazette International, Sutton, Surrey: Reed Business. – 1998. – Vol. 154, Issue 12. – P. 851–854.
15. Weiss, T. Betriebserfahrungen mit den InterCity-Neigezügen ICN der Schweizerischen Bundesbahnen [Text] / T. Weiss // ZEVrail Glasers Annalen, Berlin: Georg Siemens. – 2003. – Vol. 127, Issue 9. – P. 412–416.
16. Macheferf-Tassin, Y. Suisse, l'intercity Neigezug ou ICN: version helvète du train pendulaire [Текст] / Y. Macheferf-Tassin, C. Parel // Chemins de fer, Paris Cedex 10: Association française des amis des chemins de fer. – 2001. – Vol. 471. – P. 29–37.

17. Andersson, E. Allowing higher speeds on existing tracks-design considerations of the X2000 train for Swedish State Railways [Text] / E. Andersson, H. V. Bahr, N. G. Nilstam // ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 1989-1996 (vols 203-210). – 1995. – Vol. 209, Issue 26. – P. 93–104. doi: 10.1243/pime_proc_1995_209_261_02
18. Sasaki, K. A Lateral Semi-Active Suspensions of Tilting Train [Text] / K. Sasaki // Quarterly Report of RTRI. – 2000. – Vol. 41, Issue 1. – P. 11–15. doi: 10.2219/rtriqr.41.11
19. Enomoto, M. Development of tilt Control System Using Electro-Hydraulic Actuators [Text] / M. Enomoto, Sh. Kamoshita, M. Kamiyama, K. Sasaki, T. Hamada, A. Kazato // Quarterly Report of RTRI. – 2005. – Vol. 46, Issue 4. – P. 219–224. doi: 10.2219/rtriqr.46.219
20. Andersson, E. The development of advanced high speed vehicles in Sweden [Text] / E. Andersson, N. Nilstam // ARCHIVE: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Transport Engineering 1984-1988 (vols 198-202). – 1984. – Vol. 198, Issue 15. – P. 229–237. doi: 10.1243/pime_proc_1984_198_152_02
21. Elia, A. Fiat Pendolino: developments, experiences and perspectives [Text] / A. Elia // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 1998. – Vol. 212, Issue 1. – P. 7–17. doi: 10.1243/0954409981530643
22. Єрціян, Б. Х. Математична модель пневматичної частини комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу [Текст] / Б. Х. Єрціян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 10. – С. 200–204.
23. Любарський, Б. Г. Математична модель електромеханічної частини комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу [Текст] / Б. Г. Любарський, Б. Х. Єрціян, Д. І. Якунін // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 11. – С. 50–54.
24. Єрціян, Б. Х. Імітаційна модель комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу [Текст] / Б. Х. Єрціян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2015. – Вип. 4. – С. 97–103.
25. Єрціян, Б. Х. Імітаційне моделювання комбінованого приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду [Текст] / Б. Х. Єрціян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Механіка та машинобудування. – 2015. – № 1. – С. 48–55.
26. Любарський, Б. Г. Оптимізація параметрів лінійного двигуна нахилу кузова транспортних засобів [Текст] / Б. Г. Любарський, Б. Х. Єрціян, Д. І. Якунін, М. Л. Глебова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2015. – № 41. – С. 58–66.
27. Лазарев, Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс [Текст] / Ю. Лазарев. – СПб.: Питер; Киев: Изд. группа BHV, 2005. – 512 с.
28. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB [Текст] / И. В. Черных. – SimPowerSystems и Simulink, 2007. – 288 с.
29. Meeker, D. Finite Element Method Magnetics [Electronic resource] / D. Meeker. – 2013 Magnetics Tutorial. – Available at: <http://www.femm.info/wiki/MagneticsTutorial>