

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

ЄРІЦЯН БАГІШ ХАЧИКОВИЧ



УДК 629.429.3: 621.314

**СИНТЕЗ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ
НАХИЛУ КУЗОВА ШВИДКІСНОГО
ЕЛЕКТРИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Любарський Борис Григорович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
професор кафедри електричного транспорту
та тепловозобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Михаліченко Павло Євгенович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
професор кафедри електротехніки та електромеханіки

кандидат технічних наук, доцент
Буряковський Сергій Геннадійович,
Український державний університет
залізничного транспорту,
професор кафедри автоматизованих систем
електричного транспорту

Захист відбудеться «29» серпня 2016 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розіслано «27» липня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Якунін Д.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з напрямків підвищення швидкості руху на залізничному транспорті є застосування електрорухомого складу з механізмами нахилу кузова. Ця технологія дозволяє значно підвищити швидкість руху поїздів при проходженні кривих ділянок шляху, що є альтернативою створення нової інфраструктури для швидкісних залізниць. Перспективність застосування технології нахилу кузовів для швидкісного руху підтверджується успішною експлуатацією в 15 країнах світу понад 60 типів поїздів, які створені провідними світовими виробниками залізничного електрорухомого складу.

У поїздах в якості приводу нахилу кузова використовуються пневматичні, гідравлічні та електромеханічні системи, які мають низьку переваг та недоліків. Так, гідравлічна система має велику кількість магістралей і апаратів, які працюють під високим тиском, що знижує загальну надійність системи і підвищує ймовірність витоків робочої рідини. Пневматична система, пристрій якої, по суті, аналогічно гідравлічній, має збільшений час спрацьовування внаслідок невисокої щільності робочого середовища – повітря. Однак її елементи безпосередньо присутні у кожному типі пневматичного ресорного підвішування, без якого вже неможливо уявити сучасні швидкісні електропоїзди. Електромеханічна система, що застосовується на сучасних поїздах, не забезпечує можливості самоповернення кузова в початкове положення при відключенні живлення або інших аварійних ситуаціях, що безпосередньо впливає на безпеку руху. Хоча електромеханічні системи на основі лінійних двигунів мають можливість самоповернення, однак їх масогабаритні показники дуже значні і потребують додаткового простору на візках вагонів поїздів.

Усунення цих недоліків полягає в розвитку систем нахилу кузовів, які використовують різні за принципом дії електромеханічні та пневматичні системи, що можуть компенсувати вади кожної з них.

Таким чином, науково-практична задача, направлена на поліпшення масогабаритних показників лінійного двигуна за рахунок синтезу комбінованої електромеханічної та пневматичної системи нахилу кузова швидкісного поїзду, є актуальною для розвитку електричного транспорту, що визначила направлення дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ" відповідно до держбюджетних НДР МОН України «Розробка наукових основ створення електромеханічного приводу для механізму нахилу вагонів швидкісного залізничного транспорту України» (ДР № 0109U002392) і «Розробка практичних положень створення приміських швидкісних поїздів з нахилом кузовів з накопичувачами енергії» (ДР № 0113U000432), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – провести синтез комбінованої системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу, що складається з електротехнічної та пневматичної ланок і забезпечує можливість її застосування на залізницях з колією 1520 мм.

Для досягнення мети запропоновані наступні завдання:

- розробити методику для визначення оптимального значення кута нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу, який можливо застосовувати на залізницях з колією 1520 мм;
- визначити оптимальні параметри кута нахилу швидкісного електрорухомого складу для ділянок шляху залізниць України, на яких перспективно застосування швидкісного руху;
- узагальнити математичну модель роботи приводу нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу, що встановлює зв'язок електромагнітної сили лінійного двигуна з його геометричними та електромагнітними параметрами;
- встановити оптимальні геометричні параметри для лінійних двигунів що можуть застосовуватися у комбінованих системах нахилу кузовів;
- розробити математичну та імітаційну моделі динамічних процесів, що протікають у комбінованій системі нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу;
- визначити залежності змін у часі основних енергетичних, електричних, механічних та пневматичних показників комбінованої системи нахилу кузова.

Об'єктом дослідження є процеси, які супроводжують рух поїзда в кривих ділянках колії та процес перетворення енергії в електромеханічній та пневматичній частинах комбінованого приводу нахилу кузова.

Предмет дослідження – комбінована електромеханічна та пневматична система нахилу кузова швидкісного електропоїзду.

Методи дослідження. Методи найменших квадратів та поліномів Чебишева на множині рівновіддалених точок для апроксимації результатів чисельних експериментів по вписуванню у криві ділянки та розрахунку магнітного поля лінійного двигуна, метод генетичних алгоритмів Нелдера-Міда при визначенні оптимальних параметрів лінійного двигуна приводу нахилу кузова, метод кінцевих елементів при розрахунках магнітного поля лінійного двигуна, метод ділення відрізка навпіл для рішення задачі оптимізації при визначенні необхідного кута нахилу кузова швидкісного електропоїзду, методи імітаційного моделювання при моделюванні динамічних процесів роботи комбінованого приводу нахилу кузова.

Наукова новизна отриманих результатів:

- отримала подальший розвиток теорія створення швидкісного електрорухомого складу з кузовами, що нахиляються, в царині встановлення оптимальних величин необхідних значень кутів нахилу кузова для швидкісних поїздів, які рухаються на ділянках колії шириною 1520 мм; встановлено, що використання приводу нахилу кузова підвищує швидкість проходження кривих ділянок шляху такої колії на 17–18 %;
- вперше розроблено методику визначення оптимального кута нахилу, що включає цільову функцію по визначенню швидкості руху в залежності від кута нахилу для встановлених значень радіусу кривої і підвищення рейки та обмеження за різницю навантажень на рейки колії, за стійкості екіпажу при прохо-

дженні кривих, за можливостям навантаження на рейки й за вписуванням екіпажу в криві ділянки шляху;

– вперше вирішена задача умовної оптимізації геометричних параметрів лінійного двигуна нахилу кузова швидкісного електропоїзду; у якості параметрів обрано геометричні параметри двигуна: зовнішній діаметр якоря, внутрішні діаметри якоря та статора, а також довжина статора; запропоновано у якості цільової функції використати залежність, пропорційну різниці енергій, що може перетворити лінійний двигун та енергії, яка потрібна для руху механізму нахилу кузова;

– вперше, шляхом оптимального проектування, визначені геометричні співвідношення для лінійних двигунів, що забезпечують можливість нахилу кузова на максимальні кути від 1° до 7° ; встановлено, що при зменшенні граничного кута нахилу знижуються розміри активної частини лінійного двигуна за рахунок скорочення довжини статора та одночасного поменшання зовнішніх діаметрів і росту внутрішніх діаметрів; встановлено, що при зниженні максимального кута нахилу з 7° до 5° , маса активних матеріалів знижується на 35 %, а до 4° – на 53 %;

– вперше розроблена узагальнена математична модель комбінованої системи нахилу кузова у вигляді сукупності диференціальних рівнянь, які описують усі вузли і ланки передачі потужності від джерела електричної енергії до виконавчого механізму – балки, що нахилиється, а також роботу керованого пневматичного підвішування; встановлено зв'язки між геометричними, силовими і електрофізичними параметрами у часі; для ідентифікації параметрів лінійного двигуна застосовано метод кінцевих елементів з подальшою апроксимацією результатів поліномами Чебишева на множині рівновіддалених точок; визначення параметрів пневморесори проведено за допомогою витратної функції;

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

– вперше визначені динамічні показники складових запропонованого механізму, які покладені в основу вибору параметрів елементів напівпровідникового перетворювача, пневматичних та електромеханічних пристроїв комбінованої системи нахилу, а також визначені сили, що діють в елементах механізму нахилу.

Практичне значення отриманих результатів для електричного транспорту полягає у:

– наданні рекомендацій по встановленню оптимальних кутів нахилу кузова для швидкісних поїздів на перспективних ділянках шляху залізниць України; так, для перспективних швидкісних ділянок шляху залізниць з колією 1520 мм, найбільш поширеним необхідним кутом нахилу є кут у 3° , а максимальне необхідне його значення не перевищує 7° ;

– запропоновані для нахилу кузова застосовувати комбіновану систему, що складається з лінійного двигуна і регульованого пневмопідвішування другого ступеня; нахил кузова на кут до 5° вона забезпечує за рахунок електромеханічного приводу, що має більшу швидкодію, при великих кутах нахил проводиться за рахунок спільної дії електромеханічного і пневматичного приводів;

– встановленні оптимальних значень геометричних співвідношень лінійних двигунів, що можуть використані у комбінованій системі нахилу кузова;

– визначені основних залежностей енергетичних показників приводу нахилу; встановлено, що загальні витрати енергії електричної частини приводу нахилу за увесь цикл роботи становлять 1,318 кДж, сумарний розхід повітря пневматичної частини 0,208 кг; встановлені вимоги для вибору елементної бази напівпровідникового перетворювача (типи ключів та діодів), параметри та типу балонів пневморесор.

Практична значення дисертаційної роботи підтверджено актами о впровадженні результатів дисертаційної роботи в Харківській філії ДП «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України», від 20.12.2013 р., Харківському відділенні філії ДП «ПВІЗТУ «Укрзалізничпроект» від 20.11.2015 р., «Служби локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» від 02.12.2015 р., а також у навчальному процесі кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХПІ» від 08.09.2015 р.

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розроблено математичну та імітаційну моделі пневматичної частини комбінованого приводу нахилу кузова, розроблено підсистему імітаційної моделі системи керування комбінованого приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду. Проведено аналіз чинників, що впливають на обмеження нахилу кузова для ділянок колії 1520 мм. Розроблено методику ідентифікації параметрів лінійного двигуна, що можливо застосовувати при динамічних процесах у комбінованому приводі нахилу кузова.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали результатів дисертаційної роботи доповідалися на: Міжнародної науково-технічної конференції «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава» (м. Новочеркаськ, 2003 р.); 70 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта», (м. Дніпропетровськ, 2010 р.); Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я 2008, 2011–2015 рр. (м. Харків, 2008, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 рр.); VIII Міжнародному симпозиумі «Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта», Eltrans' 2015 (м. Санкт-Петербург, 2015 р.); IX Міжнародних науково-практичної студентської конференції магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків, 2015 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 22 наукових роботах, з них 12 статей у наукових фахових виданнях України (4 – у видання, яке входить до наукометричних баз, (1 – SCOPUS)), 10 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Повний обсяг дисертації становить 189 сторінок основного тексту, включаючи 42 рисунків по тексту; 50 рисунків на 22 окремих сторінках; 6 таблиць по тексту; 1 таблиці на 2 окремих сторінках; 139 найменувань використаних джерел на 18 сторінках; 4 додатків на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, задачі досліджень, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надано інформацію про апробацію роботи і публікації основних результатів.

У першому розділі проведено аналіз стану розвитку робіт по створенню поїздів з кузовами, що нахилиються, як однієї з перспективних транспортних технологій. Систематизовані основні етапи розвитку технології нахилу кузовів. Проведено аналіз схем систем нахилу кузовів. Встановлено, що однією з перспективних є система нахилу кузова з електромеханічним приводом на базі лінійних електродвигунів.

Показано, що однією з проблем, які виникають при створенні такого привода, є потреба зниження його масогабаритних показників. Для усунення цього недоліку запропоновано сумарний кут нахилу реалізовувати за рахунок спільного нахилу кузова лінійним приводом і пневматичним ресорним підвищенням другого ступеня, вже наявної на електропоїздах такого типу – комбінованого механізму нахилу кузова (рис. 1). Нахил кузова на кут до 5° механізм забезпечує за рахунок електромеханічного приводу, що має більшу швидкодію, при великих кутах нахил проводиться за рахунок спільної дії електромеханічного та пневматичного приводів.

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.

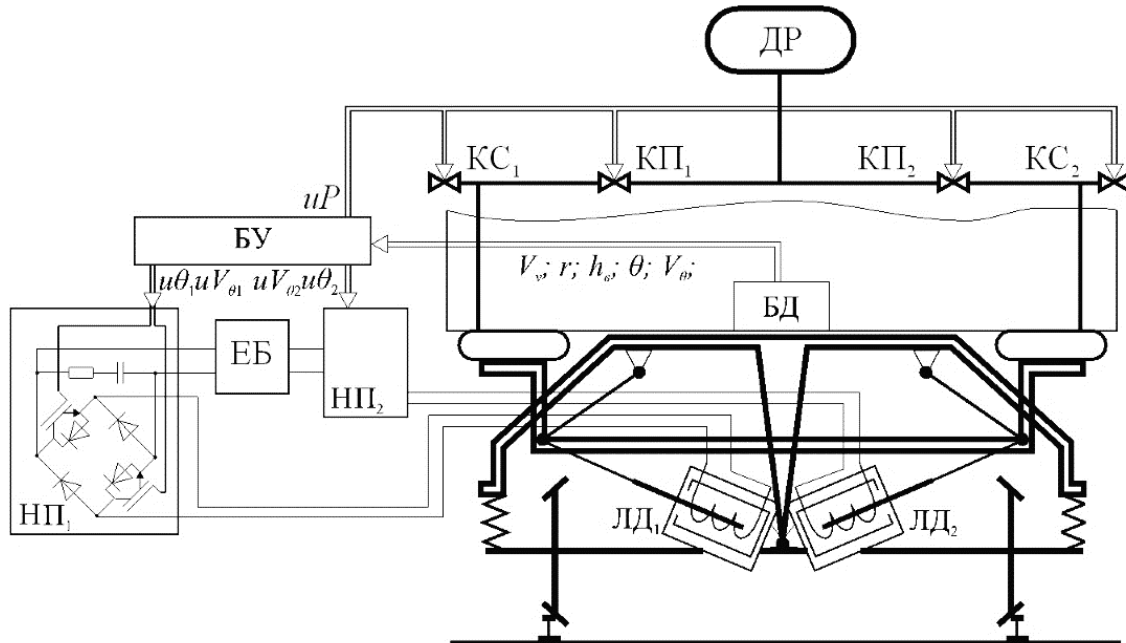


Рисунок 1 – Схема комбінованого механізму нахилу кузова

Другий розділ присвячений визначенню оптимальних значень кута нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу у кривих ділянках колії.

Розроблено методику визначення оптимального кута нахилу, що включає максимізацію цільової функції по визначенню швидкості руху в залежності від кута нахилу для встановлених значень радіусу кривої і підвищення рейки для шляхів з колією 1520 мм

$$V = \sqrt{\frac{0,7R + g \cdot (\pi\theta^\circ / 180) + \arcsin(h/1,6)}{0,0772}} \rightarrow \text{MAX}, \quad (1)$$

де V – швидкість руху транспортного засобу, R – радіус кривий, θ – кут нахилу кузова, h – підвищення зовнішньої рейки, g – прискорення вільного падіння.

Введено обмеження у вигляді нерівностей:

– за різницю навантажень на рейки колії 1520 мм для моторвагонного рухомого складу

$$\frac{V^2}{12,96R} - 6,131h \leq 1,1772; \quad (2)$$

– за стійкості екіпажу при проходженні кривих ділянок шляхів українських залізниць

$$1 \leq \frac{101,6}{2V^2 / R - 170 \cdot (h + 1,6 \cdot \sin \theta)} \leq 266; \quad (3)$$

– за можливостям навантаження на рейки Р65 та при застосуванні шляхів з залізобетонними шпалами

$$7,6 \cdot 10^{-5} \left(1,86 - 1,558 \cdot 10^{-3} R + 1,375 \cdot 10^{-6} R^2 - 4,167 \cdot 10^{-10} R^3 \right) \times \left(8,1875 \cdot 10^4 + 2,5 \sqrt{10^6 + 3,99 \cdot 10^2 V^2 + 9,559 \cdot 10^9 / V^2 + 5,17 V^5} \right) < 240; \quad (4)$$

– за вписуванням екіпажу в криві ділянки швидкісного шляху колії 1520 мм

$$V < 82,52 + 1,009 \cdot (\theta + (180/\pi) \cdot \arcsin(h/S) - 5,37) + 0,1205 R + 0,0049189 \cdot (\theta + (180/\pi) \cdot \arcsin(h/S) - 5,37); \quad (5)$$

– а також за геометрією рухомого складу для габариту 1-Т Українських залізниць

$$\theta < 7,2^\circ. \quad (6)$$

Для ділянок шляху Полтава-Південна-Лозова, Полтава-Гребінка, та Полтава-Київська-Харків-Південний, що є перспективними для введення швидкісного руху при застосуванні поїздів з кузовами, які нахиляються, проведено комплекс розрахунків оптимальних значень кутів нахилу та визначена вірогідність кута нахилу для цих ділянок. На рис. 2 приведено розподіл вірогідності кутів нахилу на цих ділянках.

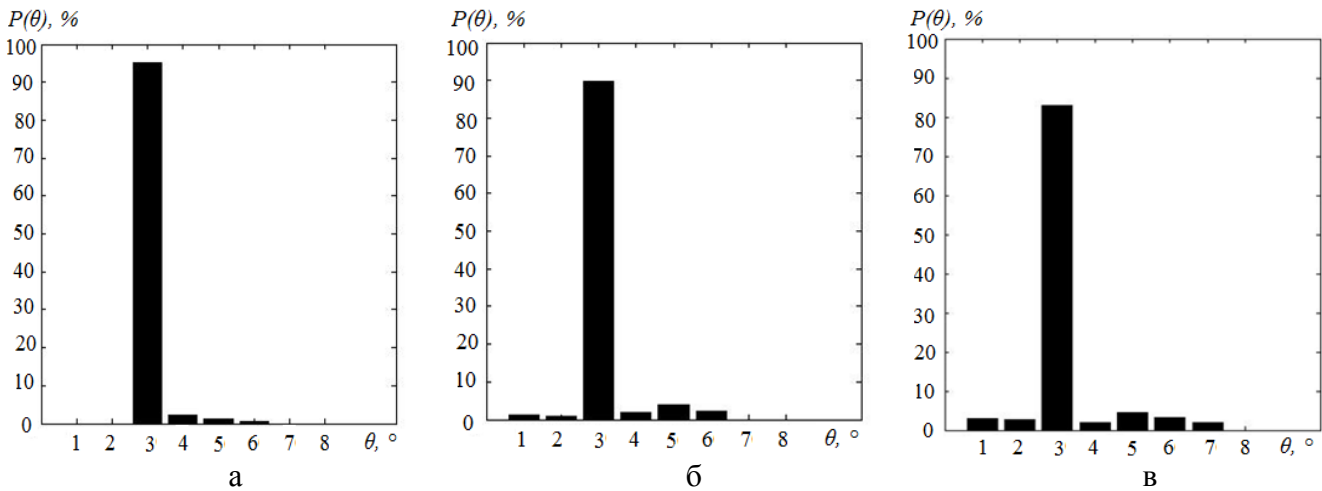


Рисунок 2 – Вірогідність $P(\theta)$ кута нахилу кузова θ на ділянках:

- а) Полтава-Південна-Лозова б) Полтава-Гребінка
в) Полтава-Київська-Харків-Південний

За результатами аналізу виразів (1–6) встановлено, що значення максимальної швидкості руху монотонно зростає зі збільшенням кута нахилу кузова електропоїзду, що обумовлено компенсацією непогашеного поперечного прискорення на 37...62 %.

Доведено, що на максимальну швидкість руху також впливає радіус кривій, по якій рухається електропоїзд. При зменшенні радіусу збільшується непогашене поперечне прискорення, яке зменшує максимальну можливу швидкість руху. Підвищення зовнішньої рейки призводить до часткової компенсації непогашеного поперечного прискорення, що дозволяє підвищити швидкість руху в кривій на 40...55 %. За результатами аналізу (рис. 2) встановлено, що для перспективних швидкісних ділянок шляху залізниць з колією 1520 мм на теренах України найбільш поширеним необхідним кутом нахилу є кут у 3° , і максимальне необхідне його значення не перевищує 7° , а використання приводу нахилу

кузова підвищує швидкість проходження рухомого складу у кривих на 17–18 %.

Третій розділ присвячено оптимізації параметрів лінійного двигуна нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу.

Введено поняття навантажувальної характеристики, як залежності сили, потрібної для нахилу кузова на заданий кут, від робочого зазору лінійного двигуна.

Навантажувальна характеристика механізму нахилу апроксимована за результатами імітаційного моделювання наступним виразом

$$F_H = 4,5 \cdot 10^5 \cdot x', \quad (7)$$

де F_H – сила опору, що зумовлена відхиленням точки прикладання сили до механізму від похідного положення на відстань x' .

Математична модель роботи лінійного двигуна електромагнітної сили визначається залежністю

$$F_T = \left(\frac{\mu_0}{2} k_3^2 J^2 \right) \frac{S_W^2}{x^2} S_Z, \quad (8)$$

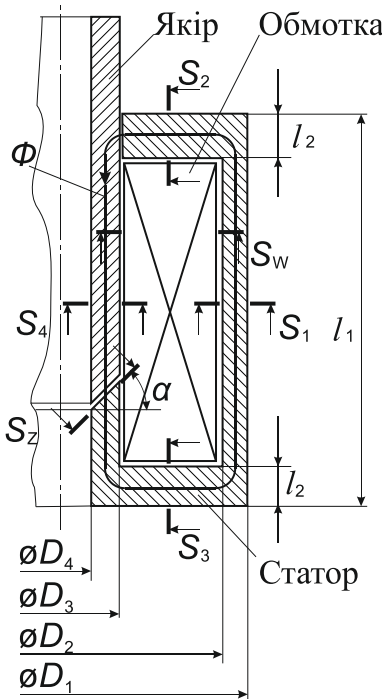


Рисунок 3 – Схема досліджуваного лінійного двигуна

де k_3 – коефіцієнт заповнення обмотки статора ЛД, J – щільність струму обмотки статора ЛД, S_W – площа обмотки статора ЛД, S_Z – площа перетину повітряного зазору, μ_0 – магнітна проникність повітря, x – хід якорю.

Адекватність спрощеної моделі (8) доведено шляхом порівняння результатів обчислення електромагнітної сили з результатами її визначення внаслідок розрахунку магнітного поля лінійного двигуна методом кінцевих елементів. Максимальне відхилення спрощеної моделі становить 6,08 %.

Сформульовано задачу умовної оптимізації геометричних параметрів лінійного двигуна. У якості параметрів обрано геометричні розміри двигуна, що вказані на рис. 3: зовнішній діаметр якоря D_2 , внутрішні діаметри якоря та статора D_3 , а також довжина статора l_1 .

Цільові функції досліджуються на мінімум

$$F'_{Ц} = (D_2^2 - D_3^2) \cdot (l_1 - 2l_2) \cdot (D_3 - D_4) \rightarrow 0. \quad (9)$$

при

– компонованих обмеженнях:

$$D_1 < 0,5 \text{ м}, l_1 < 0,6 \text{ м}, D_1 > D_2 > D_3 > D_4, l_1 + D_4 > D_3. \quad (10)$$

Обмеження за електромагнітної індукцією у повітряному зазорі

$$\frac{\mu_0 \cdot k_z \cdot J \cdot S_W}{x_{\min}} \leq B_{\max}, \quad (11)$$

де B_{\max} – максимальне значення індукції у повітряному зазорі, що дорівнює 1 Тл, k_z – коефіцієнт заповнення обмотки міддю, x_{\min} – мінімальний хід якорю.

Обмеження за умовою забезпечення лінійним двигуном функції приводу механізму нахилу в усьому робочому діапазоні є перевищення сили, яку розвиває лінійний двигун, над навантажувальною силою, що потрібна для нахилу кузова на заданий кут

$$\Delta F = \text{MIN}(\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3) \geq 0, \quad (12)$$

де ΔF_1 – значення функції ΔF у точці екстремуму, ΔF_2 – значення функції ΔF на початку робочого інтервалу, ΔF_3 – значення функції ΔF наприкінці робочого інтервалу:

$$\Delta F = F_T - F_H = \frac{\mu_0 \cdot K_3^2 \cdot J^2}{2} \cdot \frac{S_W^2 \cdot S_Z}{x^2} - 0,45 \cdot 10^6 \cdot (x_{\max} - x) \quad (13)$$

$$\Delta F_1 = F_T - F_H = \frac{\mu_0 \cdot K_3^2 \cdot J^2}{2} \cdot \frac{S_W^2 \cdot S_Z}{x_{\min}^2} - 0,45 \cdot 10^6 \cdot (x_{\max} - x_{\min}) \quad (14)$$

$$\Delta F_3 = F_T - F_H = \frac{\mu_0 \cdot K_3^2 \cdot J^2}{2} \cdot \frac{S_W^2 \cdot S_Z}{x_{\max}}. \quad (15)$$

Таким чином, задача (9) при умовах (10, 11, 12), вирішується методом генетичного алгоритму з одноточечним кросовером і селекцією за принципом рулетки. На завершальному етапі роботи оптимізаційної процедури уточнення оптимального здійснюється методом Нелдера-Міда.

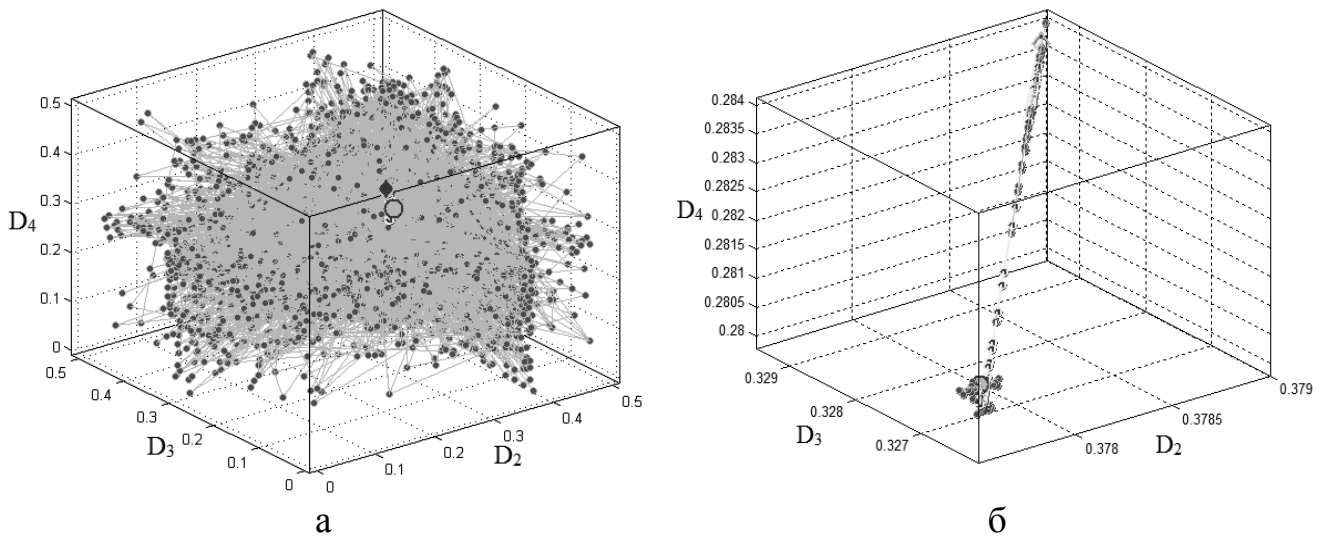


Рисунок 4 – Хід рішення задачі оптимізації параметрів ЛД при максимальному куті нахилу (θ) кузова 3° :
а) методом генетичного алгоритму б) Нелдера-Міда

За результатами вирішення задачі оптимізації визначені геометричні співвідношення для лінійних двигунів, що забезпечують можливість нахилу кузова на максимальні кути від 1° до 7° та наведено у таблиці 1. При зменшенні граничного кута нахилу знижуються розміри активної частини лінійного двигуна за рахунок скорочення довжини статора та одночасного поменшання зовнішніх діаметрів та росту внутрішніх діаметрів.

Таблиця 1 – Результати обчислення параметрів ЛД

$\theta, ^\circ$	1	2	3	4	5	6	7
$S_1, \text{м}^2$	0,0073	0,0146	0,0219	0,0291	0,0364	0,0437	0,0510
$S_w, \text{м}^2$	0,0020	0,0041	0,0061	0,0082	0,0102	0,0123	0,0143
$L_1, \text{м}$	0,2503	0,3909	0,2866	0,3019	0,3700	0,4214	0,4219
$L_2, \text{м}$	0,0084	0,0208	0,0197	0,0268	0,0333	0,0399	0,0455
$D_1, \text{м}$	0,2989	0,2714	0,4140	0,4250	0,4381	0,4506	0,4739
$D_2, \text{м}$	0,2830	0,2347	0,3789	0,3789	0,3815	0,3840	0,3996
$D_3, \text{м}$	0,2655	0,2113	0,3292	0,3130	0,3141	0,3120	0,3130
$D_4, \text{м}$	0,2474	0,1616	0,2838	0,2468	0,2287	0,2044	0,1819

Показано суттєве зниження мас активних матеріалів при обмеженні максимального кута нахилу. Встановлено, що при зниженні максимального кута нахилу з 7° до 5° маса активних матеріалів знижується на 35 %, а до 4° – на 53 %. Запропоновано напрямок удосконалення електромеханічних приводів нахилу кузова за рахунок розробки комбінованих приводів, у яких сумарний кут нахилу буде створено частково електроприводом з ЛД, а частково – іншими механізмами, які вже встановлені на рухомому складі.

Четвертий розділ присвячено розробці математичної моделі динамічних процесів у комбінованій системі нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу.

На основі узагальнення електромеханічних, пневматичних, механічних та електричних перетворювачів розроблено математичну модель комбінованої системи нахилу кузова електричного рухомого складу, яка 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:

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{U_1 - i_1 \cdot R_1 - K_{31} \cdot V_{T1}}{L_1}, \quad \frac{dN_1}{dt} = V_{T1},$$

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{U_2 - i_2 \cdot R_2 - K_{32} \cdot V_{T2}}{L_2}, \quad \frac{dN_2}{dt} = V_{T2},$$

$$\frac{dv_1}{dt} = \left((p_1 - p_a) \cdot F_{e1} - P_1 - \frac{n \cdot p_1 \cdot F_{e1}^2}{V_{\text{start}_1} + x_1 \cdot \Delta V_1} \cdot x_1 - \frac{0,126 F_{e1}^2 \cdot g}{f_{s1}^3} \frac{p_1}{R \cdot T_{M1}} \cdot v_1 \right) / m_1,$$

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{k \cdot \mu_1 \cdot f_1 \cdot K \cdot p_M \cdot \sqrt{R \cdot T_{M1}}}{F_1 \cdot (x_{01} + x_1)} \cdot \varphi(\sigma_1) - \left(\frac{k \cdot p_1}{(x_{01} + x_1)} \right) \cdot v_1, \quad \frac{dx_1}{dt} = v_1,$$

$$\begin{aligned}
\frac{dv_2}{dt} &= \left((p_2 - p_a) \cdot F_{e2} - P_2 - \frac{n \cdot p_2 \cdot F_{e2}^2}{V_{\text{start}2} + x_2 \cdot \Delta V_2} \cdot x_2 - \frac{0,126 \cdot F_{e2}^2 \cdot g}{f_{s2}^3} \frac{p_2}{R \cdot T_{M2}} \cdot v_2 \right) / m_2, \\
\frac{dp_2}{dt} &= \frac{k \cdot \mu_2 \cdot f_2 \cdot K \cdot p_M \cdot \sqrt{R \cdot T_{M2}}}{F_1 \cdot (x_{01} + x_1)} \cdot \phi(\sigma_2) - \left(\frac{k \cdot p_2}{(x_{02} + x_1)} \right) \cdot v, \\
\frac{dx_2}{dt} &= v_2, \quad \frac{dU_{Cd1}}{dt} = \frac{i_{d1}}{C_{d1}}, \quad \frac{dU_{Cd2}}{dt} = \frac{i_{d2}}{C_{d2}}, \\
-U_{uc} + i_{d1} \cdot R_{d1} + U_{Cd1} &= 0, \quad -U_{uc} + i_{VT11} \cdot R_{VT11} + U_1 + i_{VT21} \cdot R_{VT21} = 0, \\
i_{d1} \cdot R_{d1} + U_{Cd1} + i_{VD21} \cdot R_{VD21} + U_1 + i_{VD11} \cdot R_{VD11} &= 0, \\
i_{VT11} \cdot R_{VT11} + U_1 + i_{VD11} \cdot R_{VD11} = 0, \quad i_{uc1} + i_{VD11} - i_{VT11} - i_{d1} &= 0, \\
-i_{uc1} - i_{VD21} + i_{VT21} + i_{d1} = 0, \quad i_{VT11} + i_{VD21} - i_1 &= 0, \\
-U_{uc} + i_{d2} R_{d2} + U_{Cd2} = 0, \quad -U_{uc} + i_{VT12} R_{VT12} + U_2 + i_{VT22} R_{VT22} &= 0, \\
i_{d2} R_{d2} + U_{Cd2} + i_{VD22} R_{VD22} + U_2 + i_{VD12} R_{VD12} = 0, \\
i_{VT12} R_{VT12} + U_2 + i_{VD12} R_{VD12} = 0, \\
i_{uc2} + i_{VD12} - i_{VT12} - i_{d2} = 0, \quad -i_{uc2} - i_{VD22} + i_{VT22} + i_{d2} &= 0, \\
i_{VT12} + i_{VD22} - i_2 = 0, \quad i_{uc} = i_{uc1} + i_{uc2}, \quad \theta = f(x_1, x_2, N_1, N_2),
\end{aligned} \tag{16}$$

де U_{uc} – напруга джерела живлення; U_1, U_2 – напруга на електромагнітних двигунах; U_{cd1}, U_{cd2} – напруга на ємкостях демпфуючого кола; i_{uc} – струм джерела живлення; i_{uc1}, i_{uc2} – струми інверторів першого та другого двигунів; i_{VD11}, i_{VD21} та i_{VD12}, i_{VD22} – струми діодів $VD1, VD2$ першого та другого двигунів відповідно; i_{VT11}, i_{VT21} та i_{VT12}, i_{VT22} – струми ключів $VT1, VT2$ першого та другого двигунів відповідно; i_{d1} та i_{d2} – струми демпфуючих кіл першого та другого двигунів; i_1 та i_2 – струми живлення лінійних двигунів; R_{d1}, R_{d2} – обмежуючий опір демпфуючого кола першого та другого лінійних двигунів; R_1 та R_2 – опір обмоток лінійних двигунів; C_{d1} та C_{d2} – ємності демпфуючих кіл; L_1 та L_2 – індуктивності лінійних двигунів; K_{31}, K_{32} – коефіцієнти при протиЕРС двигунів; N_1 та N_2 – переміщення якорів лінійних двигунів; $V_{T1,2}$ – швидкості переміщення якорів двигунів; R_{VD11}, R_{VD21} та R_{VD12}, R_{VD22} – опори керованих резисторів – еквівалентів діодів $VD1, VD2, R_{VT11}, R_{VT21}$ та R_{VT12}, R_{VT22} – опори керованих резисторів – еквівалентів ключів $VT1, VT2$; t – час; $k = 1,4$ – показник адиабати; μ – коефіцієнт витрати, $f_{1,2}$ – площа вхідних отворів пневморесор; $K = \sqrt{2k/(k-1)}$; p_m – тиск у магістралі; T_{m1} та T_{m2} – температура повітря у пневморесорах; F_{e1} та F_{e2} – ефективна площа пневморесор; x_{01} та x_{02} – початкові координати руху днищ пневморесор; $V_{\text{start}1}$ та $V_{\text{start}2}$ – сумарний початковий об'єм порожньої частини пневморесор та додаткових резервуарів; $\phi(\sigma)$ – функція витрати повітря (витратна функція); v_1 та v_2 – швидкість переміщення пневморесор; $R = 287$ Дж/(кг·К) – газова постійна;

m_1 та m_2 – маси, що припадають на пневморесори; x_1 та x_2 – хід (переміщення верхнього днища) пневморесор; p_1 та p_2 – тиск у пневморесорах; p_a – атмосферний тиск; P_1 та P_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; ΔV_1 та ΔV_2 – питоме зміння об'єму пневморесор. Додатковий індекс 1 або 2 визначає приналежність до лівої або правої сторони.

Отримана узагальнена математична модель (16) 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. Модель 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 моделі є застосування для ідентифікації параметрів лінійного двигуна методу кінцевих елементів з подальшою апроксимацією результатів поліномами Чебишева на множині рівновіддалених точок, а також визначення параметрів пневморесори за допомогою витратної функції.

У п'ятому розділі проведено дослідження робочих властивостей комбінованого приводу шляхом імітаційного моделювання.

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 кута нахилу кузова. Імітаційна модель складається з наступних основних блоків: приводу нахилу кузова, перетворювача і модулів керування та контролю. Блок-схема загальної моделі представлена на рис. 5.

Задля спрощення імітаційної моделі, в ній наведено блок-схему лише одного лінійного електромеханічного перетворювача енергії (ЛЕМПЕ) та його напівпровідникового перетворювача (НПП). Оскільки одночасна робота двох ЛЕМПЕ не розглядається, модель під час роботи імітує дію ЛД1 в режимі нахилу та повертання.

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 $2^\circ/\text{с}$.

Процес нахилу складається з наступних етапів: від 0 до 2 с 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 с до близько 7 с проходить процес нахилу кузова до заданого кута; від близько 7 с до 13 с механізм нахилу підтримує заданий кут нахи-

лу; від 13 с до близько 18 с механізм нахилу повертає кузов у вихідне положення (див. рис. 6).

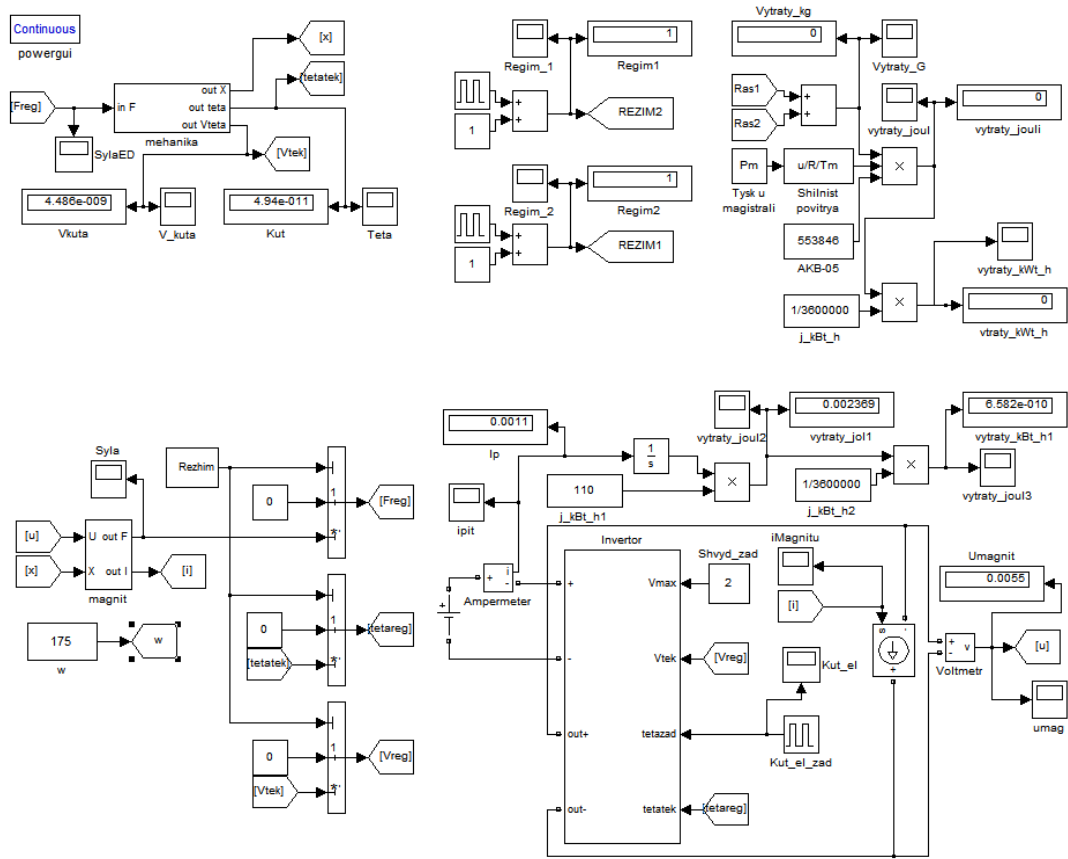


Рисунок 5 – Блок-схема загальної моделі механізму нахилу

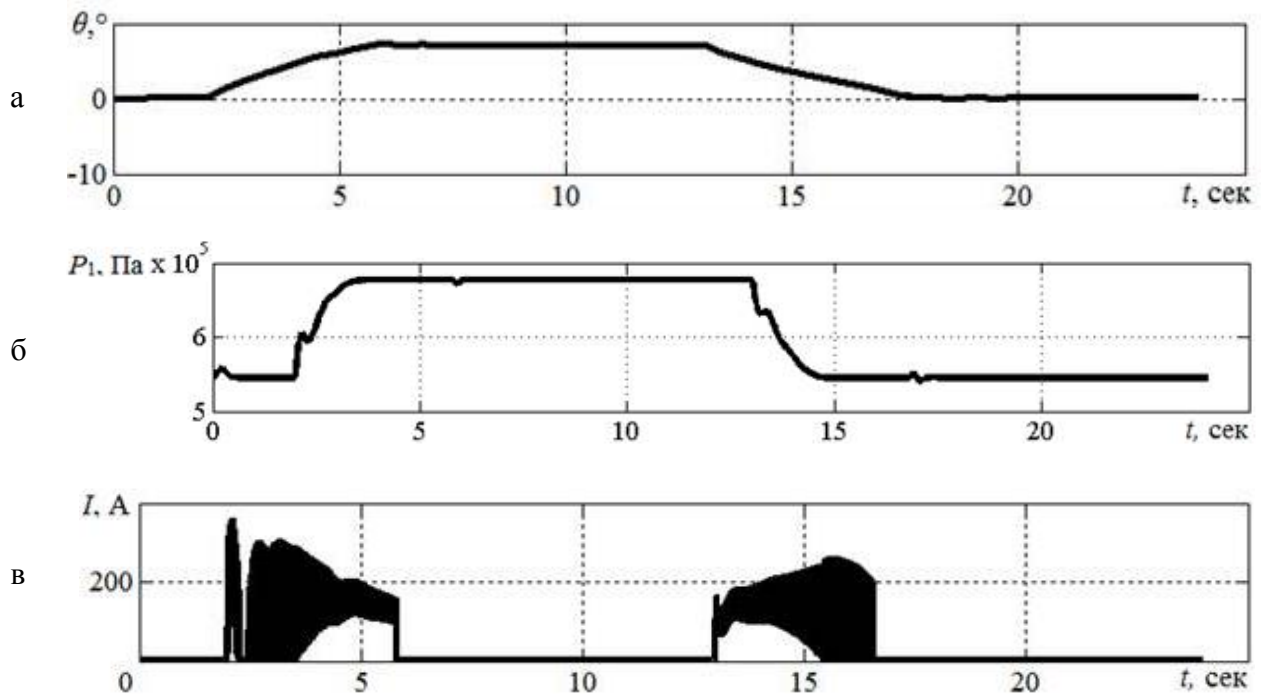


Рисунок 6 – Залежність від часу (t):

а) загального кута нахилу (θ) кузова, б) тиску у першій пневморесорі (P_1), в) струму лінійного двигуна (I)

Знайдені основні залежності енергетичних показників приводу нахилу. Отже встановлено, що: процес нахилу кузова супроводжується ростом швидкості нахилу кузова до максимального значення короточасно до 3,7 град/с, що обумовлено одночасною роботою обох систем нахилу та інерційністю кузова. При цьому швидкість електромеханічної системи не перевищує 1,3 град/с. Далі швидкість стабілізується на заданому рівні від 1,8 град/с до 2,1 град/с, що обумовлено сумісною роботою обох складових системи нахилу кузова. Тиск у пневморесорі, що наповнюється, зростає з протягом 1,5 с з 0,545 МПа до 0,677 МПа, а у пневморесорі, що стравлює у повітря, зменшується протягом 2,7с з 0,545 МПа до 0,38 МПа.

В додатках наведено: акти о впровадженні результатів дисертаційної роботи в Харківській філії ДП «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України», від 20.12.2013 р., Харківському відділенні філії ДП «ПВІЗТУ «Укрзалізничпроект» від 20.11.2015 р., «Служби локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» від 02.12.2015 р. , а також у навчальному процесі кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХП» від 08.09.2015 р.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена науково-практична задача синтезу комбінованої електромеханічної та пневматичної системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу для колії 1520 мм, який дозволив встановити оптимальні параметри лінійного двигуна та вимоги до вибору елементної бази напівпровідникового перетворювача (типи ключів та діодів), параметрів та типів балонів пневморесор.

1. Запропоновано для нахилу кузова застосовувати комбіновану систему, що складається з лінійного двигуна і регульованого пневмопідвішування другого ступеня. Нахил кузова на кут до 5° система забезпечує за рахунок електромеханічного приводу, що має більшу швидкодію, при великих кутах нахил проводиться за рахунок спільної дії електромеханічного і пневматичного приводів.

2. Розроблено методику визначення оптимального кута нахилу, що включає цільову функцію по визначенню швидкості руху в залежності від кута нахилу для встановлених значень радіусу кривої і підвищення рейки та обмеження за різницею навантажень на рейки колії, за стійкості екіпажу при проходженні кривих, за можливостям навантаження на рейки й за вписуванням екіпажу в криві ділянки шляху. Встановлено, що для перспективних швидкісних ділянок шляху залізниць з колією 1520 мм найбільш поширеним необхідним кутом нахилу є кут у 3° , а максимальне необхідне його значення не перевищує 7° . Встановлено, що використання приводу нахилу кузова підвищує швидкість проходження кривих ділянок шляху такої колії на 17–18 %.

3. Запропоновано для визначення електромагнітної сили математичну модель лінійного двигуна, що базується на спрощеному вирішенні рівняння щодо електромагнітної сили лінійного двигуна. Підтверджено адекватність спроче-

ної математичної моделі шляхом порівняння результатів обчислення електромагнітної сили з результатами її визначення внаслідок розрахунку магнітного поля лінійного двигуна методом кінцевих елементів. Максимальне відхилення спрощеної моделі становить 6,08 %.

4. Сформульовано задачу умовної оптимізації геометричних параметрів лінійного двигуна. У якості параметрів було обрано геометричні параметри двигуна: зовнішній діаметр якоря, внутрішні діаметри якоря та статора, а також довжина статора. Запропоновано у якості цільової функції використати залежність, пропорційну різниці енергій, що може перетворити лінійний двигун та енергії, яка потрібна для руху механізму нахилу кузова. У якості метода оптимізації обрано комбінований метод, що включає в себе генетичний алгоритм, на попередньому етапі пошуку. На завершальному етапі оптимізаційної процедури уточнення оптимуму здійснюється методом Нелдера-Міда.

5. Шляхом оптимального проектування визначені геометричні співвідношення для лінійних двигунів, що забезпечують можливість нахилу кузова на максимальні кути від 1° до 7° . Встановлено, що при зменшенні граничного кута нахилу знижуються розміри активної частини лінійного двигуна за рахунок скорочення довжини статора і одночасного поменшання зовнішніх діаметрів та росту внутрішніх діаметрів. Виявлено альтернативний оптимальний варіант при нахилі на 2° , при якому зменшення активних матеріалів досягнуто за рахунок деякого збільшення довжини статора при різкому зниженні усіх діаметрів. Показано суттєве зниження мас активних матеріалів при обмеженні максимального кута нахилу. Встановлено, що при зниженні максимального кута нахилу з 7° до 5° , маса активних матеріалів знижується на 35 %, а до 4° – на 53 %.

6. Розроблена 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. Модель встановлює зв'язки геометричних, силових і електрофізичних параметрів у часі. Особливістю моделі є застосування методу кінцевих елементів для ідентифікації параметрів лінійного двигуна, а також визначення параметрів пневморесори за допомогою витратної функції.

7. Наведено, що пряме рішення системи рівнянь спільно з іншими складовими приводу є досить складним і громіздким завданням. Тому пропонується для моделювання механічній частині приводу нахилу використати середовище MATLAB Simulink і його складову SimMechanics.

Задля спрощення імітаційної моделі, в ній наведено блок-схему лише одного лінійного двигуна та його напівпровідникового перетворювача. Оскільки одночасна робота двох двигунів не розглядається, модель під час роботи імітує дію ЛД1 в режимі нахилу та повертання.

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 пнев-

моресорах) та енергетичних параметрів механізму (втрати енергії на нахил кузова електричного та пневматичного приводів, розхід повітря) від заданого куту нахилу кузова.

8. Визначені динамічні показники складових запропонованого механізму, які дозволяють надати практичних рекомендацій щодо вибору параметрів елементів напівпровідникового перетворювача, пневматичних та електромеханічних пристроїв комбінованої системи нахилу, а також визначити сили, що діють в елементах механізму нахилу. 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 обмотки якоря, залежна від рівню індуктивності, що зростає із рухом ЛД при нахилі, та тривалістю імпульсу, який визначено надлишком електромагнітної сили над силою повертання. Струм ЛД змінюється за пилоподібним законом, з амплітудою близько 270 А, що має постійну складову, яка зростає протягом 0,1 с на початку руху. Струм джерела живлення носить імпульсний характер з максимальним значенням до 360 А. Тривалість імпульсів лежить в межах від 0,03 до 0,15 с, що найбільша на початку процесу нахилу. Кількість імпульсів обумовлюється різницею сил тяги та опору повертання. Встановлено, що загальні витрати енергії електричної частини приводу нахилу за весь цикл роботи становлять 1,318 кДж, сумарний розхід повітря пневматичної частини 0,208 кг.

9. Практична цінність дисертаційної роботи підтверджено актами о впровадженні результатів дисертаційної роботи в Харківській філії ДП «Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України», від 20.12.2013 р., Харківському відділенні філії ДП «ПВІЗТУ «Укрзалізничпроект» від 20.11.2015 р., «Служби локомотивного господарства» регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» від 02.12.2015 р., а також у навчальному процесі кафедри електричного транспорту та тепловозобудування НТУ «ХП» від 08.09.2015 р.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ерицяня Б.Х. Аппроксимация зависимостей электромагнитных параметров тягового синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов / Б.Г. Любарский, Т.В. Парфенюк, Б.Х. Ерицяня // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2009. – Випуск № 6 (42) / том 6 / – С. 51–54.

Здобувачем запропоновано методика апроксимації струмив на підставі методу поліномів Чебишева на множені рівновіддалених точок.

2. Ерицяня Б.Х. Развитие имитационного моделирования механизма наклона кузова с линейным электромеханическим преобразователем / Б.Х. Ерицяня, Д.И. Якунин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХП», 2010. – № 39. – С. 93–97.

Здобувачем запропоновано імітаційна модель елементів, що обмежують можливість надмірного нахилу кузова.

3. Ерицяня Б.Х. Концептуальний проект електромеханічної системи привода с лінійним двигателем для нахилу кузовів / Омеляненко В.И., Любарський Б.Г., Якунін Д.И., Ерицяня Б.Х. // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2011. – № 18. – С. 84–89.

Здобувачем проведено порівняний аналіз систем нахилу кузовів на основі лінійного та ротаційного приводів.

4. Ерицяня Б.Х. Развитие имитационного моделирования электромеханической системы привода наклона кузовов / Д.И. Якунин, Б.Х. Ерицяня, Д.Ю. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2012. – № 20. – С. 98–103.

Здобувачем запропоновано функціональну схему механізму нахилу кузова.

5. Ерицяня Б.Х. Математична модель пневматичної частини комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу / Б.Х. Ерицяня, Б.Г. Любарський, Д.І. Якунін // Системи обробки інформації: Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Харків, 2015. – № 10. – С. 200–204.

Здобувачем отримано вираз для обчислення масової витрати газу.

6. Ерицяня Б.Х. Математична модель електромеханічної частини комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу / Б.Г. Любарський, Б.Х. Ерицяня, Д.І. Якунін // Системи обробки інформації: Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Харків, 2015. – № 11. – С. 50–54.

Здобувачем проведено апроксимація електромагнітних параметрів лінійного двигуна розглянутого типу.

7. Ерицяня Б.Х. Імітаційна модель комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу / Б.Х. Ерицяня, Б.Г. Любарський, Д.І. Якунін // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – Харків, 2015. – № 4. – С. 97–103.

Здобувачем розроблено підсистему пневморесори комбінованого приводу нахилу кузова.

8. Ерицяня Б.Х. Оптимізація параметрів лінійного двигуна нахилу кузова транспортних засобів / Б.Г. Любарський, Б.Х. Ерицяня, Д.І. Якунін, М.Л. Глебова // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. – № 41. – С. 58–66.

Здобувачем проведено уточнене розв’язання задачі оптимізації параметрів лінійного двигуна методом Нелдера-Міда.

9. Ерицяня Б.Х. Задача аналізу оптимізації геометричних розмірів лінійного двигуна нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу / Б.Х. Ерицяня, Б.Г. Любарський, Д.І. Якунін // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – №5. – С. 7–11.

Здобувачем запропоновано критерій відповідності, тягові та навантажувальні характеристики. Єриця Б.Х. Імітаційне моделювання комбінованого приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду / Б.Х. Єриця, Б.Г. Любарський, Д.І. Якунін // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2015. – № 1. – С. 48–55.

Здобувачем отримані залежності витрат повітря та енергії комбінованої системи нахилу кузова.

11. Єриця Б.Х. Критерии и ограничения для определения угла наклона кузова скоростного электроподвижного состава / Б.Х. Єриця // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – №2. – С. 52–60.

12. Єриця Б.Х. Моделювання комбінованої системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу залізничного транспорту / Б.Х. Єриця, Б.Г. Любарський, Д.І. Якунін // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2016. – Випуск № 9(80) / том 2/ – С. 4–17.

Здобувачем розроблено імітаційна модель пневматичної ресори та підсистеми обчислення тиску у пневморесорі. Проведено комплекс експериментів по отриманню енергетичних показників комбінованого приводу нахилу кузова.

13. Єриця Б.Х. Демпфирование вертикальных колебаний локомотивов на пневморессорах / Б.Х. Єриця // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. 17–19 июня 2003 г. – Новочеркасск, 2003. – С. 151–153

14. Єриця Б.Х. Електромеханічний привод клапану регульованого дроселя для системи пневмопідвішування рухомого складу / Б.Х. Єриця // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. докл. XVI Міжнар. наук.-практ. конф. 4–6 червня 2008 р.– Харків: НТУ “ХПІ”. – 2008. – С. 206.

15. Єриця Б.Х. Электромеханический привод системы наклона кузова / Д.И. Якунин, Е.С. Редченко, Б.Х. Єриця // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тез. докл. 70 Международной науч.-практич. конф. 15-16 апреля 2010 г. – Д.: ДИИТ/ – 2010. – №6(85). – С. 113.

Здобувачем розроблена імітаційна модель демпферів механічної системи нахилу кузова.

16. Єриця Б.Х. Дослідження роботи електромеханічної системи привода нахилу кузова швидкісного рухомого складу на базі лінійного двигуна / Д.І. Якунін, Б.Х. Єриця // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. докл. XIX Міжнар. наук.-практ. конф. 1–3 червня 2011 р.– Харків: НТУ “ХПІ”. – 2011. – С. 207.

Здобувачем визначені вимоги до елементної бази напівпровідникового перетворювача.

17. Єриця Б.Х. Моделювання системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу з комбінованим електромеханічним та пневматичним приводом / Д.І. Якунін, Б.Х. Єриця, Б.Г. Любарський // Інформаційні техноло-

гії: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. докл. XX Міжнар. наук.-практ. конф. 15–17 травня 2012 р. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2012. – С. 168.

Здобувачем розроблена підсистема пневматичного приводу механізму нахилу кузова.

18. Єріцян Б.Х. Імітаційне моделювання комбінованої електропневматичної системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу / Б.Х. Єріцян, Д.І. Якунін, Б.Г. Любарський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. докл. XXI Міжнар. наук.-практ. конф. 29–31 травня 2013 р. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2013. – С. 199.

Здобувачем розроблена пневматична частина імітаційної моделі комбінованого приводу нахилу кузова.

19. Єріцян Б.Х. Лінійний двигун для комбінованої електропневматичної системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу / Б.Х. Єріцян, Д.І. Якунін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. докл. XXII Міжнар. наук.-практ. конф. 21–23 травня 2014 р. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2014. – С. 200.

Здобувачем встановлено, що сегментний якір не може бути застосований, оскільки його тягова характеристика має локальний мінімум, що лежить нижче характеристики навантаження.

20. Єріцян Б.Х. Повышение эффективности электромеханического привода наклона кузова скоростного электропоезда / Б.Г. Любарский, Б.Х. Ерицян, Д.И. Якунин // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: тез. докл. VIII Междун. симп. Eltrans 7–9 октября 2015 г. – Санкт-Петербург: Петербургский гос. ун-т путей сообщения. – 2015. – С. 48–49.

Здобувачем запропоновано використання керованого ресорного підвищування для підвищення ефективності системи нахилу кузова швидкісного електропоїзду.

21. Єріцян Б.Х. Дослідження електропневматичної системи нахилу кузова швидкісного дизель-поїзду / В.С. Коломієць, Б.Х. Єріцян // IX Міжн.а наук.-практ. студентська конф. магістрантів Національного технічного університету “ХПІ”: матеріали конференції: у 4-х ч. – Ч. 2, 07–09 квітня 2015 р. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2015. – С. 35–36.

Здобувачем розроблена модель пневматичної частини приводу нахилу кузова.

22. Єріцян Б.Х. Оптимізація компонентів комбінованої електропневматичної системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу / Б.Х. Єріцян, Б.Г. Любарський, Д.І. Якунін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. докл. XXIII Міжнар. наук.-практ. конф. 20-22 травня 2015 р. – Харків: НТУ “ХПІ” – 2015. – С. 169.

Здобувачем проведена оптимізація параметрів лінійного двигуна приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду.

Єріцян Б.Х. Синтез комбінованої системи нахилу кузова швидкісного електричного рухомого складу. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт; Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, 2016 р.

Вирішена науково-практична задача синтезу комбінованої електромеханічної та пневматичної системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу для колії 1520 мм, яка дозволила встановити оптимальні параметри лінійного двигуна та вимоги до вибору елементної бази напівпровідникового перетворювача (типи ключів та діодів), параметрів та типів балонів пневморесор. Запропоновано для нахилу кузова застосовувати комбіновану систему, що складається з лінійного двигуна і регульованого пневмопідвішування другого ступеня. Нахил кузова на кут до 5° забезпечується за рахунок електромеханічного приводу, що має більшу швидкодію, при великих кутах нахил проводиться за рахунок спільної дії електромеханічного і пневматичного приводів.

Ключові слова: кут нахилу кузова електропоїзду, підвищення швидкості руху електрорухомого складу, синтез комбінованого приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду, електромеханічна та пневматична частини системи нахилу кузова, система керування приводом нахилу кузова електропоїзду, лінійний двигун.

Єріцян Б.Х. Синтез комбинированной системы наклона кузова скоростного электрического подвижного состава. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, 2016 г.

Решена научно-практическая задача синтеза комбинированной электромеханической и пневматической системы наклона кузова скоростного электроподвижного состава для колеи 1520 мм, которая позволила установить оптимальные параметры линейного двигателя и требования к выбору элементной базы полупроводникового преобразователя (типы ключей и диодов), параметров и типов баллонов пневморесор.

На основании многокритериального анализа разработана методика определения оптимального угла наклона, включающая целевую функцию по определению скорости движения в зависимости от угла наклона для установленных значений радиуса кривой и возвышения рельса и ограничения по разнице нагрузок на рельсы пути, по устойчивости экипажа при прохождении кривых, по возможностям нагрузки на рельсы и по вписыванию экипажа в кривые участки пути. Установлено, что для перспективных скоростных участков пути железных дорог с колеей 1520 мм наиболее распространенным необходимым углом наклона является угол в 3° , а максимальное необходимое его значение

не превышает 7° . Использование привода наклона кузова повышает скорость прохождения кривых участков пути на 17-18 %.

Определены оптимальные геометрические соотношения для линейных двигателей, обеспечивающих возможность наклона кузова на максимальные углы от 1° до 7° . Предложено для наклона кузова применять комбинированную систему, состоящую из линейного двигателя и регулируемого пневмоподвешивания второй ступени. Наклон кузова на угол до 5° обеспечивается за счет электромеханического привода, обладающего большим быстродействием, а при больших углах наклон проводится за счет совместного действия электромеханического и пневматического приводов.

Определены динамические показатели составляющих предложенного механизма, которые позволяют предоставить практические рекомендации по выбору параметров элементов полупроводникового преобразователя, пневматических и электромеханических устройств комбинированной системы наклона, а также определить силы, действующие в элементах механизма наклона.

Ключевые слова: угол наклона кузова электропоезда, повышение скорости движения электроподвижного состава, синтез комбинированного привода наклона кузова скоростного электропоезда, электромеханическая и пневматическая части системы наклона кузова, система управления приводом наклона кузова электропоезда, линейный двигатель.

Yeritsyan B.Kh. Body tilt combined system synthesis of high-speed electric rolling stock. A manuscript.

The thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences on specialty 05.22.09 – Electric Transport. – National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", 2016

Scientific and practical problem of combined electromechanical and pneumatic body tilt system of high-speed rolling stock for railway gauge of 1520 mm is solved. It is allowed to determine optimum parameters of linear motor and requirements to select elementary base for semiconductor transformer (variations of keys and diodes), parameters and types of air springs tanks is well is to define with the loads on rolling stock components of structure mounted on bodies. It is offered to use body tilt combined system which is made up of linear motor and controlled pneumatic hanging of the second the level. Body tilt by the angle up to 5° is achieved by means of electromechanical drive possessing joint action. At great angles tilt is realized at the expense of electromechanical and pneumatic drive joint action.

Keywords: electric train body the angle tilt, electric rolling stock speed increase, synthesis of combined body tilt drive of high-speed electric train, electromechanical and pneumatic section of body tilt system, control system of electric train body tilt drive, linear motor.



Відповідальний за випуск
к.т.н., доц. кафедри електричного транспорту
та тепловозобудування НТУ "ХПІ"
Кривякін Г.В.

Підписано до друку 15.07.2016 р.
Формат 60 x 84 1/16. Папір офсетний.
Друк на ризографі. Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. №

Надруковано в копі-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідотство ВО4№022953)
м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер-Б-1
Тел. 7-170-354