

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ЯКУНІН ДМИТРО ІГОРОВИЧ

УДК 621.332.3: 621.336.2

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА ПРИВОДА
З ЛІНІЙНИМ ДВИГУНОМ ДЛЯ НАХИЛУ КУЗОВІВ
ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

05.22.09 – електротранспорт

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2010

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
Маслієв Вячеслав Георгійович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Болюх Володимир Федорович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
професор кафедри загальної електротехніки

кандидат технічних наук, доцент
Буряковський Сергій Геннадійович,
Українська державна академія
залізничного транспорту,
доцент кафедри систем електричної тяги

Захист відбудеться «09» червня 2010 р. о 14³⁰ 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 розісланий «29» квітня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Любарський Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищити якість обслуговування пасажирів на залізницях шляхом скорочення часу перебування у дорозі можна або збільшивши конструктивну швидкість рухомого складу, або скоротивши обмеження швидкості на окремих ділянках рейкової колії. Оскільки найбільші обмеження швидкості наявні у кривих, доцільно або прокласти нові швидкісні магістралі, позбавлені кривих ділянок малого радіусу, або упровадити системи для нахилу кузовів, залишити в експлуатації існуючу мережу залізниць та поступово вводити перспективний рухомий склад замість існуючого.

Ефективність застосування технології нахилу кузовів для швидкісного пасажирського руху підтверджується успішною експлуатацією в 15 країнах світу більш 60 типів потягів, які створені провідними світовими виробниками. У якості силового приводу для нахилу кузовів цих потягів використовують гідравлічні, пневматичні та електромеханічні системи. Гідравлічна система залежить від погодних умов, є екологічно недосконалою через можливість витоків робочої рідини, її конструкція, експлуатація і ремонт відносно складні; пневматична система не забезпечує належної швидкодії; електромеханічна система – найперспективніша, але не забезпечує належного рівня безпеки руху через відсутність самоповернення кузова у разі відмов. Усунути вказані недоліки електромеханічного приводу можливо шляхом використання приводу на базі лінійного електродвигуна.

Таким чином дисертаційна робота, що спрямована на дослідження електромеханічних систем, які забезпечують безпосередній привод механізму нахилу кузовів швидкісного рухомого складу і оцінку впливу таких систем на експлуатаційні властивості системи «колесо-рейка», є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі електричного транспорту та тепловозобудування НТУ "ХПІ" відповідно до науково-дослідної теми Міністерства освіти і науки України М3106 "Розробка наукових основ створення електромеханічного приводу для механізму нахилу вагонів швидкісного залізничного транспорту України" (ДР № 0109U002392) та госпдоговірної теми "Дослідження та проектні роботи зі створення візка для дизель-поїздів з підвищеними динамічними та експлуатаційними показниками" (БАТ ХК «Луганськтепловоз», м. Луганськ, ДР № 0109U002429), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – розробка наукових основ створення електромеханічних систем, що забезпечують безпосередній привід з лінійним двигуном механізму нахилу кузовів швидкісного поїзда і оцінки впливу таких систем на експлуатаційні властивості цих поїздів.

Для досягнення зазначеної мети вирішено наступні задачі:

- на базі аналізу силових і енергетичних характеристик різних типів кінематичних схем, а також систем електромеханічного перетворення енергії вибрано раціональну схему та її складові для приводу нахилу кузова вагону;

- створено математичну модель процесу електромеханічного перетворення енергії, що зв'язує силові, енергетичні і експлуатаційні характеристики вагонів з кузовами, які нахилиються, з геометричними і електромагнітними параметрами електромеханічного перетворювача, геометричними параметрами кінематичного механізму, а також з параметрами рейкової колії і швидкості рухомого складу;

- шляхом імітаційного моделювання досліджено робочі властивості механізму нахилу і оцінено вплив геометричних і електрофізичних параметрів всіх його компонентів на силові, енергетичні і експлуатаційні характеристики вагонів з кузовами, що нахилиються;

- на базі проведених досліджень розроблено концептуальний проект екіпажа з механізмом нахилу кузова і шляхом моделювання оцінено його вплив на динамічні та експлуатаційні характеристики.

Об'єктом дослідження є процес електромеханічного перетворення енергії в системі нахилу кузова рухомого складу.

Предмет дослідження – система нахилу кузова з лінійним електромеханічним перетворювачем енергії.

Методи дослідження. Імітаційне моделювання застосовано для дослідження процесів в електромеханічній системі нахилу кузова; цифрове моделювання – для дослідження процесів в системі «колесо-рейка» при русі екіпажа по рейковій колії з нерівностями в плані; метод кінцевих елементів – для розрахунку магнітного поля лінійного електромеханічного перетворювача енергії; методи наближення функцій – для апроксимації дискретних експериментальних даних цифрового моделювання; для підтвердження достовірності моделі – фізичне моделювання механічної частини приводу системи нахилу кузова і електромеханічного перетворювача енергії.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- вперше запропонована система нахилу кузова на основі лінійного електромеханічного перетворювача енергії, особливістю якої є використання у якості силового приводу коаксіального лінійного двигуна постійного струму електромагнітного типу броньової конструкції циліндрової форми та напівпровідникового перетворювача енергії прямоходового типу;

- вперше розроблено математичну та імітаційну моделі перетворення енергії в системі нахилу кузовів, особливостями яких є представлення електричної частини з використанням пакету Matlab SimPowerSystem, механічної – SimMechanics та визначення параметрів лінійного двигуна за розрахунками магнітного поля методом кінцевих елементів, що апроксимовані поліномами Чебишева на множині рівновіддалених точок;

- встановлено ряд закономірностей впливу як геометричних параметрів кінематичної схеми механічної частини системи нахилу кузова, так і геометричних і електромагнітних параметрів лінійного електродвигуна на силові та енергетичні характеристики елементів системи електромеханічного перетворення енергії;

- запропоновано критерії капітальних і експлуатаційних витрат, що дозволяють оцінити ефективність роботи лінійного двигуна. Встановлено, що критерії є суперечливими, для вибору раціональних значень геометричних і електрофізичних параметрів двигуна потрібно використовувати функцію прийняття рішення. В ході рішення задачі оптимізації для конкретного тестового завдання встановлено ефективне значення діаметру якоря та кількість витків;

- встановлено, що нахил кузова в кривих не чинить значного впливу на величину бічних і направляючих сил, як і на знос коліс. Визначальне значення має обмеження швидкості руху в кривих по припустимому рівню направляючих сил.

Практичне значення отриманих результатів для електричного транспорту полягає у науковому обґрунтуванні можливості застосування лінійного електромеханічного перетворювача енергії у якості силового приводу механізму нахилу кузовів рухомого складу. Розроблено рекомендації по вибору співвідношень параметрів лінійного двигуна і перетворювача енергії. Створено універсальну імітаційну модель приводу системи нахилу кузова, що дозволяє досліджувати різні механізми з лінійними електромеханічними перетворювачами енергії, а також універсальну математичну модель, використання якої дозволяє оцінити вплив нахилу кузова на знос коліс різного рухомого складу.

Практична цінність підтверджена актом про упровадження дисертаційної роботи від 12.01.2010 р. на ВАТ ХК «Луганськтепловоз».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведення аналізу систем нахилу кузовів і типів силового приводу; розробка узагальненої математичної моделі електромеханічної системи нахилу кузовів; визначення шляхом цифрового моделювання характеристики навантаження механізму нахилу кузовів для випадків руху на прямій ділянці шляху і в кривій за наявності піднесення зовнішньої рейки; розробка механічної частини імітаційної моделі процесів електромеханічного перетворення енергії в системі нахилу

кузовів, а також імітаційної моделі для отримання характеристик навантажень механізму нахилу кузова різної конфігурації при різному розташуванні силового приводу; формулювання концепції компоновки перспективного екіпажу з кузовом, що нахиляється, особливістю якого є застосування у якості силового приводу лінійного електромеханічного перетворювача енергії на базі коаксіального електромагнітного двигуна.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались на: XI – XVII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2003 – 2009 рр.), I міжнародній науково-практичній конференції «Наука в транспортному вимірі» (м. Київ, 2005 р.), V міжнародній науково-практичній конференції «Технічне регулювання. Сертифікація, діагностика і безпека на залізничному транспорті», (м. Ялта, 2009 р.), XVI міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», (м. Алушта, 2009 р.), семінарах секції №8 «Фізико-технічні проблеми енергетики електричного і дизель-електричного транспорту» Наукової ради НАН України по комплексній проблемі «Наукові основи електроенергетики» (м. Харків, 2003, 2004 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 15 наукових публікаціях, з них: 11 статей у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, 2 додатків, списку літератури. Загальний обсяг дисертації становить 202 сторінки, з них: 45 рисунків по тексту; 48 рисунків на 25 окремих сторінках; 11 таблиць по тексту; 3 таблиці на 8 сторінках; 2 додатків на 2 сторінках; списку використаних літературних джерел з 109 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** проведено огляд сучасних типів швидкісних поїздів із кузовами, що нахиляються. Показано, що технологія нахилу кузовів є вельми поширеною у розвинутих країнах, де вирішено збільшити швидкість руху поїздів, зберігши існуючу мережу залізниць. Розглянуто основні етапи розвитку технології нахилу кузовів та виконано аналіз поїздів, де ця технологія застосовується.

Проаналізовано найпоширеніші системи нахилу кузовів – пасивну, напівактивну та активні. Встановлено, що належний кут нахилу кузова забезпечує тільки активна система. Розглянуто існуючі типи силового приводу активних систем нахилу кузова – пневматичний, гідравлічний, електрогідравлічний та електромеханічний. Встановлено, що перспективним є електромеханічний привід, а його недоліки можна усунути шляхом використання лінійного електродвигуна. На підставі аналізу сформульовано задачі досліджень та напрямки їх вирішення.

Другий розділ присвячено розробці наукових основ роботи привода з лінійним електродвигуном для нахилу кузовів – побудові навантажувальної характеристики механізму, обранню лінійного двигуна, тягова характеристика якого найбільш відповідає навантажувальній та створенню узагальненої математичної моделі, що описує взаємодію в процесі роботи усіх вузлів та ланок системи нахилу кузовів та встановлює зв'язки геометричних, силових та електрофізичних параметрів із показниками, що характеризують ефективність роботи системи.

Схема механізму нахилу приведена на рис. 1. Сигнали, що надходять від блоку датчиків БД, а саме швидкість руху V_v , поточне значення радіусу кривої r , піднесення зовнішньої рейки h_e , а також поточний кут нахилу кузова θ і швидкість його зміни V_θ , подаються на блок керування БК, що формує на їх основі сигнали керування $uV_{\theta 1,2}$ і $u\theta_{1,2}$.

силовими ключами напівпровідникових перетворювачів НП₁ і НП₂. Навантаженням перетворювачів є лінійні двигуни ЛД1 і ЛД2, що є силовим приводом механізму нахилу кузова.

Рис. 1. Схема механізму нахилу кузова

Робота цієї системи визначається, в основному, типом обраного електромеханічного перетворювача енергії, а його конфігурація та складові елементи – навантажувальною характеристикою виконуючого механізму, як залежністю повертаючої сили механізму від кута нахилу кузова. Для прийнятої схеми, подібної до «люлечного» підвішування вагонів та застосованої на поїзді Х2000, навантажувальна характеристика має вигляд, наведений на рис.

2, де
1 – похідне положення; 2 – піднесення зовнішньої рейки 150 мм; 3 – рух у кривій радіусом 600 м зі швидкістю 160 км/год.

Встановлено, що відцентрова сила та піднесення зовнішньої рейки несуттєво впливають на вигляд навантажувальної характеристики механізму, отже в подальшому дослідженні ними вирішено знехтувати.

Система електромеханічного перетворення енергії має містити напівпровідниковий перетворювач та лінійний двигун. У якості лінійних двигунів розглянуто коаксіальні, постійного струму, як позбавлені поперечних кінцевих ефектів. Такі двигуни не потребують складних напівпровідникових перетворювачів та мають непогану перевантажувальну здатність.

Серед лінійних двигунів постійного струму розглянуто індукційні, магнітоелектричні, електродинамічні та електромагнітні. Встановлено, що індукційні двигуни діють короткочасно, магнітоелектричні є надто складними у виготовленні, що виключає їх з подальшого розгляду. Щільніше досліджено двигуни електродинамічного та електромагнітного типу, останні – із незмінним робочим зазором та силою, що діє паралельно йому, а також зі змінним повітряним зазором та силою, що діє вздовж зазору. Електродинамічні двигуни не розвивають належної тягової сили. Форма тягової характеристики двигуна з постійним зазором не відповідає навантажувальній кривій. Отже, як базовий варіант обрано двигун зі змінним зазором, тягова характеристика якого наведена на рис. 3, найбільш відповідає навантажувальній характеристиці механізму нахилу.

Рис. 2. Навантажувальна характеристика

Рис. 3. Тягові характеристики

Для повної відповідності тягової характеристики навантажувальній потрібне регулювання магніторушійної сили обмотки збудження лінійного двигуна шляхом застосування прямоходового інвертора, оскільки його схема на відміну від імпульсного регулятора, забезпечує відсутність перенапружень на ключах та на відміну від мостового інвертора потребує лише два ключі.

Узагальнена математична модель роботи системи нахилу кузовів складається з трьох основних блоків, що описують необхідний кут нахилу кузова, механічну частину системи нахилу кузова, а також систему електромеханічного перетворення енергії.

$$\frac{d\theta_n}{dt} = -\frac{d\gamma}{dt} - V_v^2 \left(\frac{dr}{dt} \right) \cdot 1/g \cdot r \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \left(1 + \frac{V_v^4}{g^2 \cdot r \cdot \frac{1}{r^2}} \right),$$

$$\frac{d\omega_\theta}{dt} \cdot I + \frac{d\theta}{dt} \cdot \beta + \theta \cdot c = K_1 F_{EM} + K_2 mg,$$

$$\begin{aligned}
\frac{di}{dt} &= \frac{U - iR - K_3 V_T}{L}, \\
-U_{uc} + i_d R_d + U_{Cd} &= 0, \\
-U_{uc} + i_{VT1} R_{VT1} + U + i_{VT2} R_{VT2} &= 0, \\
i_d R_d + U_{Cd} + i_{VD2} R_{VD2} + U + i_{VD1} R_{VD1} &= 0, \\
i_{VT1} R_{VT1} + U + i_{VD1} R_{VD1} &= 0, \\
i_{uc} + i_{VD1} - i_{VT1} - i_d &= 0, \\
-i_{uc} - i_{VD2} + i_{VT2} + i_d &= 0, \\
i_{VT1} + i_{VD2} - i &= 0, \\
\frac{dU_{Cd}}{dt} &= \frac{id}{C_d},
\end{aligned} \tag{1}$$

де θ_n – кут повної компенсації, γ – кут нахилу колії, V_v – швидкість руху потягу, r – миттєвий радіус кривої, g – прискорення сили тяжіння, ω_θ – швидкість нахилу, I – момент інерції, θ – кут нахилу, β – демпфування нахилу,

c – жорсткість, $F_{EM} = -\frac{1}{V_T} \left(L \frac{di^2}{dt} + i^2 \frac{dL}{dt} \right)$ – електромагнітна сила, K_1, K_2 – змінні

коефіцієнти врахування геометрії механізму, m – маса на один привід, i – струм лінійного двигуна, U – напруга, R – активний опір обмотки, V_T – швидкість руху якоря, $L = f(i, N)$ – індуктивність; $K_3 = f(i, N)$ – коефіцієнт протиелектропорухої сили (протиЕРС), N – робочий зазор двигуна, i_{uc} – струм джерела живлення, i_{VD} – струм діодів, i_{VT} – струм ключів, i_d – струм демпфуючого ланцюга, i – струм лінійного двигуна, U_{uc} – напруга джерела живлення, R_d – опір демпфуючого ланцюга, U_{Cd} – напруга конденсатора демпфуючого ланцюга, R_{VT} – опір керованого резистора – еквівалента ключа, U – напруга на електромагнітному двигуні, R_{VD} – опір керованого резистора – еквівалента діода.

Отже, отримано узагальнену математичну модель роботи системи нахилу кузовів у вигляді сукупності диференціальних рівнянь, що описують роботу всіх вузлів та ланок передачі потужності від джерела електричної енергії до виконавчого механізму і встановлюють зв'язки геометричних, силових і електрофізичних параметрів з величинами, що характеризують якість та ефективність роботи як окремих механізмів, так і пристрою приводу нахилу кузова в цілому. Встановлено показники, що характеризують систему нахилу кузова та параметри, що впливають на ці показники.

У **третьому розділі** проведено дослідження робочих властивостей приводу нахилу кузова шляхом імітаційного моделювання. За допомогою пакету візуального програмування Simulink створено імітаційну модель приводу нахилу кузовів, доведено її достовірність та вирішено тестову задачу. У межах тестової задачі визначено граничні значення кінематичних параметрів, обрано параметри лінійного двигуна та оцінено ефективність електромеханічного перетворювача енергії.

Для моделювання механічної частини застосовані модулі і компоненти SimMechanics. Моделювання коаксіального лінійного двигуна постійного струму електромагнітного типу виконано з використанням компонентів SimPowerSystem. Система управління і зв'язку між механічною та електричною частинами здійснюються за допомогою S-модулів стандартних бібліотек MATLAB Simulink.

Імітаційна модель (рис. 4) описує роботу трьох основних блоків: приводу нахилу кузова, перетворювача і регулятора. Привід нахилу кузова містить допоміжну підсистему «mehanika», що включає підсистеми механічної частини «mehanizm» та моделювання лінійного електромагнітного перетворювача енергії (ЛЕМПЕ) «magnit» (рис. 5).

Вхідним параметром допоміжної підсистеми є сила, що реалізується на якорі ЛЕМПЕ, вихідними параметрами – зазор N між якорем лінійного двигуна і проставкою, кут нахилу кузова екіпажа та швидкість його зміни. Величина зазору подається на вхід підсистеми «magnit», як і сигнал напруги на електромагнітному двигуні, що його отримано з відповідного виходу перетворювача. Вихідним параметром підсистеми «magnit» також є струм двигуна електромагнітного типу. Робочі параметри і характеристики електромагнітного двигуна (сила втягування якоря, індуктивність та противЕРС залежно від зазору та струму) отримано шляхом розрахунку електромагнітного поля в середовищі FEMM методом кінцевих елементів (рис. 6).

Рис. 4. Блок-схема загальної імітаційної моделі

Рис. 5. Блок-схема імітаційної моделі
лінійного двигуна

Рис. 6. Магнітне поле
двигуна

До імітаційної моделі параметри і характеристики двигуна вводяться у вигляді S-функцій шляхом апроксимації залежностей поліномами Чебишева на безлічі рівновіддалених точок – для визначення безперервних функцій в будь-якій точці інтервалу варіювання струму і зазору. Тіло, що моделює балку, яка нахиляється, навантажено частиною ваги кузова екіпажа, що доводиться на один привід механізму нахилу. Механізм приводиться в дію шляхом прикладання сили до якоря одного з лінійних двигунів, що імітуються парою тіл, сполучених ковзуном, який дозволяє лише повздовжнє пересування. Фізичні параметри вказаних тіл отримано через дослідження твердотілих моделей відповідних компонентів, побудованих в SolidWorks. Перетворювач представлено підсистемою «Invertor», навантаженням якого є кероване джерело струму ЛЕМПЕ.

Підтвердження адекватності імітаційних моделей для механічної частини приводу нахилу кузова, було зроблено шляхом зняття навантажувальної характеристики на масштабній фізичній моделі виконуючого механізму нахилу кузова (М 1:5), а лінійного двигуна – шляхом зняття тягової характеристики коаксіального лінійного двигуна постійного струму електромагнітного типу потужністю 1,5 кВт, силою тяги 2 кН і робочим ходом 15 мм. Порівняння розрахункових і експериментальних даних показало їх задовільну збіжність (до 15%).

Для дослідження робочих властивостей механізму нахилу і оцінки впливу геометричних і електрофізичних параметрів всіх його компонентів на силові, енергетичні і експлуатаційні характеристики вагонів з кузовами, що нахиляються, було вирішено тестову задачу для типової конфігурації механізму нахилу кузова сучасного рейкового транспортного засобу.

Показники, що характеризують механічну частину системи нахилу – рівень повертаючої сили та залежність цієї сили від місця прикладання до балки, що нахиляється. Параметри, що впливають на ці показники – конфігурація виконуючого механізму (геометрична відстань між осями шарнірів підвісу балки, що нахиляється, та розташування осей шарнірів лінійного двигуна).

Ефективність роботи електричної частини механізму нахилу оцінено за критеріями капітальних та експлуатаційних витрат. Параметри, що впливають на ці критерії – розміри магнітопроводу, величина зазору між якорем та статором, індуктивність та активний опір обмотки збудження.

Механізм нахилу кузова має одну ступінь свободи. За габаритні обмеження прийнято габаритні розміри візка. З умови стійкості механізму миттєвий центр повороту має завжди знаходитися вище за центр мас кузова. Розміри магнітопроводу лінійного двигуна вибрано з умов вписування у вільний простір візка.

Показано, що раціональним варіантом розміщення осі шарніру якоря лінійного двигуна на балці, що нахилиється, є таке, що співпадає з областю пересічення прийнятних значень ходу якоря (100-150 мм) і сили (50-100 кН). Точку осі шарніру кріплення корпусу лінійного двигуна до рами візка слід обирати так, щоб в кінці робочого ходу при максимумі необхідної сили, вісь двигуна зайняла положення, перпендикулярне лінії, що сполучає точку закріплення якоря двигуна до балки і миттєвий центр повороту системи, що розташований в точці перетину осей важелів підвісу.

Вплив на ефективність роботи електричної частини механізму нахилу кузова кількості витків обмотки лінійного електромагнітного двигуна w і діаметру його якоря D_y оцінено за критеріями капітальних K_1 та експлуатаційних K_2 витрат.

Критерій капітальних витрат

$$K_1 = \frac{V_{\text{міді}} \cdot \rho_{\text{міді}} \cdot C_{\text{міді}} + V_{\text{сталі}} \cdot \rho_{\text{сталі}} \cdot C_{\text{сталі}}}{A_{\text{мех}}}, \quad (2)$$

де $V_{\text{міді}}$, $V_{\text{сталі}}$ – об'єм активної міді і сталі; $\rho_{\text{міді}}$, $\rho_{\text{сталі}}$ – щільність міді і сталі; $C_{\text{міді}}$, $C_{\text{сталі}}$ – вартість міді і сталі; $A_{\text{мех}} = \int_{N=0}^{N_{\text{max}}} F_H dN$ – робота, що потрібна для нахилу механізму на заданий кут.

Критерій поточних витрат

$$K_2 = \frac{W_p \cdot C_{\text{електр}}}{A_{\text{мех}}}, \quad (3)$$

де $C_{\text{електр}}$ – вартість електроенергії; $W_p = U \int_{t=0}^{t_3} i dt$ – кількість спожитої енергії.

Виявлено, що при варіюванні діаметра якоря двигуна критерії K_1 і K_2 (рис. 8) є суперечливими при всіх значеннях, отже будь-яке значення D_y є оптимальним (вся область визначення K_1 і K_2 є Парето-оптимальною). Для вирішення завдання по вибору ефективного діаметру якоря запропонована функція прийняття рішення (рис. 7)

$$K = \sqrt{K_{1\text{відн}}^2 + K_{2\text{відн}}^2} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де $K_{1\text{відн}} = K_1 / K_{1\text{баз}}$, $K_{2\text{відн}} = K_2 / K_{2\text{баз}}$ – відносні критерії капітальних та поточних витрат. За базові величини $K_{1\text{баз}}$ і $K_{2\text{баз}}$ вибрані значення відповідних критеріїв для електромагнітного двигуна з діаметром якоря 200 мм і числом витків в обмотці 1000.

Рис. 7. Залежність критеріїв від діаметру якоря

1, 2 – зони обмеження за функціональністю та компоновкою

Встановлено, що функція прийняття рішення має мінімум в точці, відповідній діаметру якоря 220 мм, що відповідає ефективному значенню діаметру якоря для тестової задачі.

Оцінку ефективності роботи лінійного двигуна від числа витків w проведено за відносним критерієм поточних витрат $K_{2\text{відн}}$ (рис. 8). Показано, що критерій має мінімум при кількості витків обмотки $w = 2500$.

На підставі проведених досліджень вироблені рекомендації щодо вибору співвідношень параметрів лінійного двигуна. Так, діаметр корпусу D_K слід вибирати найбільшим, виходячи

з можливості вписування в габарит візка. Діаметр якоря має бути $0,4...0,45 D_K$. Довжина лінійного двигуна не має бути менш суми товщини лобової і тильної стінок корпусу, довжини проставки і подвоєної довжини ходу його якоря – за умовою запобігання вилученню якоря з корпусу при зворотному ході. Кількість витків має бути приблизно $10 U_{un}$.

Таким чином, на прикладі вирішення тестової задачі показано алгоритм застосування розроблених наукових основ вибору раціональних геометричних і електрофізичних параметрів приводу системи нахилу кузовів вагонів швидкісних поїздів.

У **четвертому розділі** запропоновано концептуальний проект електромеханічної системи приводу з лінійним двигуном для нахилу кузовів. Наведено загальну компоновку екіпажу, викладено результати цифрового моделювання системи нахилу кузова та проведено порівняльний аналіз традиційного та запропонованого електромеханічних приводів систем нахилу.

Інформація про швидкість руху, яка надходить зі швидкостеміра, як і інформація про бічне прискорення, яка дозволяє оцінити радіус кривої і про піднесення зовнішньої рейки, що отримується з гіроскопа, надходить до обчислювального модулю, що розраховує необхідний кут нахилу кузова.

У тому випадку, якщо розрахунковий кут перевищує максимальне значення (8°), модуль генерує команду на пониження швидкості руху. Сигнали керування від обчислювального модуля по інформаційних шинах подаються на блоки силової електроніки, які керують подачею енергії від енергоблоку на механізми нахилу візків і струмоз'ємника.

Інформація про досягнутий кут нахилу знімається з датчиків виконуючих механізмів. В разі порушення функціонування механізму, інформація про це передається від блоків силової електроніки на обчислювальний модуль, програма якого передбачає, залежно від рівня небезпеки, або обмеження функціональності механізмів, або повне їх відключення при відповідному зниженні максимальної швидкості руху. Датчик реалізованого кута нахилу може бути конструктивно об'єднаний або з якорем лінійного електромагнітного двигуна (тоді величина кута нахилу буде функцією лінійного переміщення штока), або з шарніром важеля підвісу (тоді величина кута нахилу буде функцією кута його повороту).

Модель візка, оснащеного механізмом нахилу з силовим приводом на базі ЛЕМПЕ, представлена на рис. 9. Параметри тягового коаксіального лінійного двигуна постійного струму електромагнітного типу броньової конструкції, який використано в приводі нахилу кузова, обрано згідно запропонованим рекомендаціям. Зовнішній діаметр лінійного двигуна вибраний максимальним за умовами компоновки у візку з урахуванням обмеження, що вноситься вимогами габариту 1-Т по ГОСТ 9238-59 для обресорених рухомих частин, $D_K = 390$ мм. При цьому діаметр якоря двигуна $D_{\text{я}} = 170$ мм, а кількість витків обмотки $w = 2000$.

На рис. 10 приведені природні тягові характеристики двигуна електромагнітного типу, отримані при різній МРС в його обмотці (1, 2, 3 – тягові при МРС 130, 110 та 90 кА – відповідно); а також крива навантаження 4, відповідна прийнятому розташуванню лінійного двигуна і конфігурації виконавчого механізму. Показано, що на ділянці робочого ходу двигуна, відповідного робочому зазору 28 – 44 мм, магніторушійна сила в обмотці може підтримуватися на рівні 110 кА, на ділянках 0 – 28 і 44 – 105 мм потрібно пониження величини МРС шляхом широко-імпульсного регулювання за допомогою напівпровідникового перетворювача енергії.

Рис. 9. Візок з механізмом нахилу

Рис. 10. Характеристики нахилу

З використанням імітаційної моделі, приведеної на рис. 5, проведено цифрове моделювання нахилу кузова електропоїзда на заданий кут $\theta = 7^\circ$ при заданій максимальній швидкості нахилу $2^\circ/\text{с}$. Результати цифрового моделювання приведені на рис. 11.

Рис. 11. Результати цифрового моделювання

Показано, що максимальне значення напруги на транзисторах складає 230В, а струму 80А, отже, як силові ключі слід обирати IGBT-транзистори, розраховані на напругу і струм не менш вказаних. Це можуть бути модулі фірми Fuji Electric 2MBI 100N-060 або 2MBI 100TA-060, що мають схожі параметри. Модулі призначені для комутації ланцюгів напругою до 600 В із струмом до 100 А і є півмостом IGBT, що дозволяє на одному модулі реалізувати всю силову частину інвертора. Ці модулі застосовуються для комутації ланцюгів великої потужності, управління двигунами постійного і змінного струму, а також в джерелах безперебійного енергопостачання.

Порівняльний аналіз традиційного та запропонованого електромеханічних приводів систем нахилу показує виграв у потужності (1,7 рази), максимальній силі (1,8 рази). Збільшення надійності та наявність самоповернення доводять доцільність використання запропонованої системи привода нахилу кузова, навіть незважаючи на деяку зростаючу питомих вагових показників.

У п'ятому розділі наведено результати дослідження впливу нахилу кузова на робочі властивості системи «колесо-рейка», зокрема рівня зносу бандажів коліс. Цифрове моделювання виконано за допомогою математичної моделі динаміки рейкового транспортного засобу, що містить нелінійні, із змінними коефіцієнтами диференціальні рівняння руху екіпажа по рейковій колії з нерівностями в плані та складається з рівнянь зв'язків і сил.

Знос коліс оцінювався по критерію «прогноз-знос» гребенів I_T за період часу $0 \rightarrow T$ і по прокату їх поверхонь кочення

$$I_T = \chi_T \cdot \int_0^T N_{ijk} \cdot f_T \cdot \omega_0 \sqrt{h_T^2 + x_T^2 / \sin^2 \theta_T} + \omega_K \sqrt{r_0^2 + h_T^2 + x_T^2 / \sin^2 \theta_T} \cdot dt, \quad (5)$$

де χ_T – коефіцієнт зносу гребнів; N_{ijk} – напрямна сила, що діє на гребінь К-го колеса j-ї колісної пари i-го візка; f_T – коефіцієнт тертя гребеня по боковій грані рейки; ω_0 – кутова швидкість колеса при чистому коченні; h_T – відстань від поверхні кочення колеса до точки контакту гребеня з бічною гранню рейки; x_T – «забіг» гребеня; θ_T – кут нахилу утворюючої гребеня до площини колії; ω_K – кутова швидкість колеса при буксуванні; r_0 – середній радіус колеса.

Зсув центр мас кузова в поперечному напрямі при повороті на кут θ відбуватиметься у бік зовнішньої рейки кривої, якщо центр мас розміщується нижче за вісь повороту кузова, та навпаки – у бік внутрішньої рейки, якщо центр мас вище за вісь повороту. При цьому зміниться величина сил, що діють на рейки. Ці сумарні навантаження заносяться в масив вихідних даних для розрахунку сил тертя, а отже напрямних сил, які визначають знос гребеня.

Варіюваними параметрами були швидкість руху, радіус кривої, кут примусового нахилу системи «кузов-пасажир» і пов'язаний з ним зсув центру мас. Критеріями експлуатаційної якості екіпажа є бічні і напрямні сили, кути набігання і, як наслідок – знос гребенів коліс і прокат бандажів.

Встановлено, що дисперсія рамних сил і кутів набігу гребенів коліс на рейки залишається практично незмінною, тобто помітного впливу на ці характеристики не виявлено. Показано, що бічні сили на передній колісній парі головного вагону плавно зростають у міру збільшення швидкості руху і дещо знижуються пропорційно куту нахилу

кузова, якщо зсув його центру мас відбувається назовні кривої, але зростають – якщо всередину кривої.

Виявлено, що при зменшенні радіусу кривої знос гребенів зростає при всіх швидкостях руху не залежно від кута нахилу кузова. Знос гребенів також зростає прямо пропорційно швидкості руху.

При швидкостях руху від 80 до 160 км/год знос гребенів зростає швидше, ніж в інтервалі 40 – 80 км/год, що можна пояснити збільшенням напрямних сил – у зв'язку із зростанням їх відцентрової складової і швидкостей ковзання гребенів по бічних гранях рейок.

При зменшенні радіусу кривої нахил кузова зменшує знос гребенів, в середньому на 7 %, якщо центр мас зміщується всередину кривої і збільшує до 5% – якщо назовні кривої порівняно з варіантом, коли нахил кузова відсутній. При зростанні кута нахилу від 0 до 8° на всіх швидкостях руху знос пропорційно зменшується по лінійній залежності.

Таким чином, рівень зносу гребенів в екіпажах з механізмами для нахилу кузова практично близький до серійних.

Прокат коліс по колу катання при русі по кривих ділянках

$$\Phi = P_{ijk} \cdot \frac{x}{R} = P_{ijk} \cdot \delta_{\Gamma}, \quad (6)$$

де P_{ijk} – вертикальне навантаження від колеса на рейку, x – полюсна відстань передньої колісної пари візка, δ_{Γ} – кут набігу гребеня на рейку, що визначається в процесі інтегрування математичної моделі.

Виявлено, що при човниковому русі транспортного засобу по ділянці колії, що має криві, більшою мірою спостерігатиметься прокат того колеса колісної пари, яке навантажується більше в результаті дії механізму для примусового нахилу кузова. Нахил кузова на кут до 8° дозволяє збільшити швидкість руху до 30 %, а по допустимому рівню напрямних сил – на 20 %. Отже, для подальшого збільшення швидкості руху доцільно переходити на більш важкі рейки та укріплювати верхню будову рейкової колії.

У **додатках** наведено протокол дослідження електроприводу на базі лінійного двигуна, а також акт про впровадження результатів дисертаційної роботи на ВАТ ХК «Луганськтепловоз».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення надійності та ефективності роботи електромеханічних систем нахилу кузовів швидкісного рухомого складу за рахунок впровадження безпосереднього електроприводу на базі лінійного двигуна.

1. Закладено наукові основи проектування безпосередніх електромеханічних приводів механізму нахилу кузовів швидкісних поїздів з лінійним двигуном постійного струму електромагнітного типу циліндрової форми в сукупності з напівпровідниковим перетворювачем енергії.

2. Розроблена узагальнена математична модель роботи електромеханічної системи нахилу кузовів у вигляді сукупності диференціальних рівнянь, що описують всі вузли і ланки передачі потужності від джерела електричної енергії до виконавчого механізму, яка встановлює зв'язок геометричних, силових і електрофізичних параметрів з показниками, що характеризують якість і ефективність роботи як окремих механізмів, так і пристрою приводу нахилу кузова в цілому. Введені поняття характеристик навантаження і тягової, як залежностей від кута нахилу і переміщення якоря лінійного двигуна сили, що повертає кузов, та електромагнітної сили взаємодії якоря і статора лінійного двигуна.

3. На базі узагальненої математичної моделі створена в середовищі Matlab Simulink імітаційна модель процесів електромеханічного перетворення енергії в системі нахилу кузовів, яка дозволила встановити вплив параметрів на робочі властивості системи. Особливістю моделі є представлення електричної частини з використанням пакету Sim PowerSystem, механічної – SimMechanics, параметри лінійного двигуна визначаються за результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів та апроксимовані поліномами Чебишева на множині рівновіддалених точок. Достовірність роботи моделі підтверджена результатами фізичного моделювання складових елементів – масштабних фізичних моделей механічної частини системи нахилу і лінійного електродвигуна.

4. Встановлено ряд закономірностей впливу як геометричних параметрів кінематичної схеми механічної частини системи нахилу, так і геометричних і електромагнітних параметрів лінійного електродвигуна на силові і енергетичні характеристики всіх елементів системи електромеханічного перетворення енергії. На прикладі вирішення тестової задачі показано алгоритм застосування розроблених наукових основ вибору раціональних геометричних і електрофізичних параметрів приводу системи нахилу кузовів вагонів швидкісних поїздів.

5. Запропоновано оцінювати ефективність роботи лінійного двигуна по двом критеріям: капітальних і експлуатаційних витрат. Встановлено, що ці критерії є суперечливими і знаходяться в Парето-оптимальній області, отже для вибору раціональних значень геометричних і електрофізичних параметрів двигуна необхідно використовувати функцію прийняття рішення. Завдяки рішенню задачі оптимізації для тестового завдання встановлено ефективне значення геометричних параметрів магнітопроводу, індуктивності та активного опору обмотки. Сформульовані рекомендації по вибору раціональних співвідношень параметрів лінійного двигуна.

6. Розроблений концептуальний проект системи нахилу кузовів з силовим приводом на базі лінійного електромеханічного перетворювача енергії. Порівняльний аналіз цього приводу з традиційним електромеханічним приводом на базі ротативного двигуна і гвинтової пари показав, що пропонується двигун має виграв в потужності (1,7 разу) і максимальній силі, що розвивається (1,8 разу). Крім того, істотно зросли надійність і безпека системи завдяки наявності самоповернення кузова у вихідне положення при відмовах системи електропостачання.

7. Показано, що нахил кузова не робить істотного впливу на розподіл вертикальних сил. При цьому знос гребенів коліс зростає в середньому на 5% порівняно з традиційним екіпажем. Прокат поверхонь катання змінюється пропорційно поперечному зсуву центру мас кузова. Збільшення швидкості руху в кривій найбільш обмежує величина припустимих напрямних сил.

8. Розроблені в дисертації комплексні технології використовуються ВАТ ХК «Луганськтепловоз» у практиці проектування перспективного рухомого складу для залізниць України – при обранні варіантів системи для нахилу кузовів, що підтверджується актом про упровадження дисертаційної роботи від 12.01.2010 р. на ВАТ ХК «Луганськтепловоз».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Якунин Д.И. Особенности моделирования динамики перспективных локомотивов в кривых участках пути / В.Г.Маслиев, Д.И.Якунин // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В.Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2004.– № 8 (78). – С. 82–88.

Здобувачем проведений аналіз результатів моделювання і їх обробка.

2. Якунин Д.И. Моделирование взаимодействия колеса с рельсом при движении экипажей по кривым / В.Г.Маслиев, Д.И.Якунин // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В.Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2005.– № 8 (90).– С. 55–57.

Здобувачем запропонований метод моделювання і проведений аналіз його результатів.

3. Якунин Д.И. К вопросу о повышении скоростей движения подвижного состава / В.Г.Маслиев, Д.И.Якунин // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В.Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2006.– №8 (102). – С. 92–96.

Здобувачем проведений огляд зарубіжних джерел і обробка результатів цифрового моделювання.

4. Якунин Д.И. Мировой опыт использования поездов с наклоном кузова в кривых участках пути / В.Г.Маслиев, Д.И.Якунин // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2006.– № 26.– С. 127–130.

Здобувачем проведений аналіз систем для нахилу кузова в кривій і сформульовані висновки.

5. Якунин Д.И. Некоторые результаты компьютерного моделирования динамики перспективного подвижного состава / В.Г.Маслиев, Д.И.Якунин, Ю.В.Макаренко [и др.] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В.Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2007.– №8(114).– С. 31–34.

Здобувачем запропонований розвиток математичної моделі вертикальної динаміки екіпажа.

6. Якунин Д.И. К вопросу о выборе системы управления наклоном кузова скоростного подвижного состава / В.Г.Маслиев, Д.И.Якунин // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В.Даля.– Луганськ: СХУ ім. В.Даля, 2008.– № 5 (123). – С. 33–36.

Здобувачем виконаний аналіз зарубіжних джерел і сформульовані висновки.

7. Якунин Д.И. Катковый стенд – инструмент сертификации подвижного состава скоростных железных дорог / В.И.Омельяненко, Г.В.Кривякин, Д.И.Якунин, Е.С.Редченко // Залізничний транспорт України.– ВП ДНДЦ УЗ: Київ, 2009.– №2/1(75).– С. 7 – 10.

Здобувачем проведений аналіз сил, що діють на екіпажі в кривих, а також розглянуті їх аналітичні залежності.

8. Якунин Д.И. Взаимодействие колес с рельсами при движении экипажей с устройствами для наклона кузова / В.Г.Маслиев, Д.И.Якунин, Ю.В.Макаренко // Залізничний транспорт України.– ВП ДНДЦ УЗ: Київ, 2009.– №2/1(75).– С. 71 – 73.

Здобувачем виконаний огляд джерел, а також обробка і аналіз результатів моделювання.

9. Якунин Д.И. Математическая модель автоматизированного электропривода на базе линейного шагового двигателя/ Джафари Хенджани Сейед Моджтаба, Б.Г.Любарский, Е.С.Рябов, В.П.Северин, В.Ф.Чернай, Д.И.Якунин // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ».– Львів: ЕКОінформ, 2009.– С. 88–91.

Здобувачем проведений пошук раціональних степенів апроксимуючих поліномів.

10. Якунин Д.И. Влияние наклона кузова вагона при движении по кривым участкам пути на взаимодействие колес с рельсами / Д.И.Якунин, Ю.В.Макаренко, В.Г.Маслиев // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 30. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009.– С. 248–251.

Здобувачем виконано огляд джерел, обробка результатів моделювання і формулювання

деяких висновків.

11. Якунин Д.И. Нагрузочная характеристика механизма наклона кузова / Д.И.Якунин // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2009. – № 47. – С. 72-75.

12. Якунин Д.И. Имитационное моделирование нагрузочной характеристики механизма наклона кузовов / Д.И.Якунин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 6/6(42). – С.14 – 17.

13. Якунин Д.И. Базовая математическая модель горизонтальной динамики локомотива / В.Г.Маслиев, С.А.Калинина, Д.И.Якунин // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 2000. – № 118. – С. 17–20.

Здобувачем проведена комп'ютерна обробка результатів цифрового моделювання.

14. Якунин Д.И. Проблемы скоростного движения поездов в Украине / В.Г.Маслиев, Д.И.Якунин // Междунар. информ. научн.-техн. журнал «Вагонный парк». – Харьков: изд-во «Подвижной состав». – 2007. – №1. – С. 11-13.

Здобувачем виконаний огляд джерел, а також обробка і аналіз результатів моделювання.

15. Якунин Д.И. Поезда с наклоняемыми кузовами для скоростного пассажирского движения / В.И.Омельяненко, Г.В.Кривякин, Д.И.Якунин, Е.С.Редченко // Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». – Харків: Техностандарт, 2008. – №5 С. 12-17.

Здобувачем проведений аналіз найбільш поширених схем нахилу кузовів і типів силових приводів, сформульовані їх основні переваги і недоліки.

АНОТАЦІЇ

Якунін Д.І. Електромеханічна система приводу з лінійним двигуном для нахилу кузовів швидкісного рухомого складу. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2010 р.

Дисертацію присвячено розробці наукових основ створення електромеханічної системи на базі лінійного двигуна, що забезпечує безпосередній привід нахилу кузовів швидкісного рухомого складу залізниць.

На базі аналізу силових і енергетичних характеристик різних кінематичних схем, а також типів електромеханічного перетворення енергії вибрана раціональна схема і її компоненти для приводу нахилу кузова вагона у вигляді сукупності підвісу важелів балки, що нахилиється, до рами візка, лінійного двигуна постійного струму електромагнітного типу циліндрової форми, який виконано в сукупності з напівпровідниковим перетворювачем енергії.

Створено узагальнену математичну модель електромеханічного перетворення енергії. На її основі створено імітаційну модель, що дозволила дослідити робочі властивості механізму нахилу і оцінити вплив геометричних і електрофізичних параметрів всіх його компонентів на силові, енергетичні і експлуатаційні характеристики вагонів з кузовами, що нахилиються. Встановлено ряд закономірностей впливу як геометричних параметрів кінематичної схеми механічної частини системи нахилу, так і геометричних і електромагнітних параметрів лінійного електродвигуна на силові і енергетичні характеристики елементів системи електромеханічного перетворення енергії.

Розроблений концептуальний проект електромеханічної системи приводу з лінійним двигуном для нахилу кузовів, шляхом цифрового моделювання оцінено вплив нахилу на експлуатаційні характеристики швидкісного рухомого складу.

Ключові слова: електрорухомий склад, електромеханічні системи, перетворення потужності, нахил кузова, лінійний двигун, прогноз-знос коліс.

Якунин Д.И. Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов скоростного подвижного состава. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, 2010 г.

Диссертация посвящена разработке научных основ создания электромеханической системы на базе линейного двигателя, обеспечивающей непосредственный привод наклона кузовов скоростного подвижного состава.

На базе анализа силовых и энергетических характеристик различных кинематических схем, а также типов электромеханического преобразования энергии, выбрана рациональная схема и ее компоненты для привода наклона кузова вагона в виде совокупности рычажного подвеса наклоняемой балки к раме тележки, линейного двигателя постоянного тока электромагнитного типа цилиндрической формы, выполненного в совокупности с полупроводниковым преобразователем энергии.

Создана обобщенная математическая модель электромеханического преобразования энергии, связывающая силовые, энергетические и эксплуатационные характеристики вагонов с наклоняемыми кузовами – с геометрическим и электромагнитными параметрами электромеханического преобразователя, геометрическими параметрами кинематического механизма, а также с параметрами пути и скорости движения подвижного состава. Введены понятия нагрузочной и тяговой характеристик, как зависимостей от угла наклона и перемещения якоря линейного двигателя силы, возвращающей кузов и электромагнитной силы взаимодействия якоря и статора линейного двигателя, позволяющие наглядно количественно и качественно оценивать влияние варьируемых параметров на силовые и энергетические свойства механизма наклона кузовов.

На базе обобщенной математической модели создана имитационная модель процессов электромеханического преобразования энергии в системе наклона кузовов, которая позволяет исследовать влияние параметров системы на ее рабочие свойства. Достоверность работы модели подтверждена результатами физического моделирования отдельных ее элементов.

Путем имитационного моделирования исследованы рабочие свойства механизма наклона и оценено влияние геометрических и электрофизических параметров всех его компонентов на силовые, энергетические и эксплуатационные характеристики вагонов с наклоняемыми кузовами. Установлен ряд закономерностей влияния как геометрических параметров кинематической схемы механической части системы наклона (расстояние между шарнирами подвеса, положение центра масс, размещение точек закрепления статора и якоря линейного электродвигателя и др.), так и геометрических и электромагнитных параметров линейного электродвигателя (диаметр якоря, длина хода якоря, наружный диаметр статора, количество витков обмотки статора и др.) на силовые и энергетические характеристики элементов системы электромеханического преобразования энергии.

Разработан концептуальный проект электромеханической системы привода с линейным двигателем для наклона кузовов, путем цифрового моделирования оценено влияние наклона на эксплуатационные характеристики скоростного подвижного состава. Показано, что наклон кузова не оказывает существенного влияния на распределение вертикальных сил. Прокат поверхностей катания изменяется пропорционально поперечному смещению центра масс кузова. Увеличение скорости движения в кривой наиболее ограничивает величина допустимых боковых сил.

Ключевые слова: электроподвижной состав, электромеханические системы, преобразование мощности, наклон кузова, линейный двигатель, прогноз-износ колес.

Yacunin D.I. Electromechanical system of a drive with the linear engine for an inclination of bodies of a high-speed rolling stock. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in speciality 05.22.09 – Electrical Transport. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2010.

The thesis is dedicated to the working out of scientific bases of creation of electromechanical system on the basis of the linear engine, providing a direct drive in the mechanism of an inclination of bodies of a high-speed rolling stock.

On the basis of the analysis of power and power characteristics of a various kind of kinematic schemes, and also types of electromechanical transformation of energy the rational scheme and its components for a drive of an inclination of a body of the car in the form of set lever suspension brackets of an inclined beam to a frame of the cart, the linear engine of a direct current of electromagnetic type of the cylindrical form executed in aggregate with the semi-conductor converter of energy is chosen.

The generalized mathematical model of electromechanical transformation of energy is created. On its basis the imitating model is created, allowed to investigate working properties of the mechanism of an inclination and to estimate influence of geometrical and electrophysical parameters of all its components on power, power and operational characteristics of cars with inclined bodies. A number of laws of influence as geometrical parameters of the kinematic scheme of a mechanical part of system of an inclination, and geometrical and electromagnetic parameters of the linear electric motor on power and power characteristics of elements of system of electromechanical transformation of energy is established.

With the linear engine the conceptual project of electromechanical system of a drive is developed for an inclination of bodies, by digital modelling influence of an inclination on operational characteristics of a high-speed rolling stock is estimated.

Key words: electrical rolling stock, electromechanical systems, power transformation, body inclination, the linear engine, the forecast-deterioration of wheels.

Підписано до друку 08.04.2010 р. Формат 60х90 1/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 0,9 Наклад 100 прим. Замовлення № 028261

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16