

УДК 629.429.3:621.313

Б.Г. Любарський, Б.Х. Єрціян, Д.І. Якунін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ КОМБІНОВАНОГО ПНЕВМАТИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ НАХИЛУ КУЗОВА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

В науковій статті розглядається актуальна проблема створення транспортного засобу з комбінованим пневматичним та електромеханічним приводом нахилу кузова, що дозволяє істотно підвищити швидкість руху на кривих ділянках. У роботі створена математична модель у вигляді сукупності диференціальних рівнянь, що описують усі вузли і ланки передачі потужності від джерела електричної енергії до виконавчого механізму - балки, що нахиляється, а також роботу керованого пневматичного підвішування. Вона встановлює зв'язки геометричних, силових і електрофізичних параметрів з величинами, що характеризують якість і ефективність роботи як окремих механізмів, так і облаштування приводу нахилу кузова в цілому.

Ключові слова: комбінований привод, нахил кузова, лінійний двигун, математична модель.

Вступ

Постановка проблеми. Підвищення швидкості руху можна здійснити двома основними шляхами. По-перше, можна відмовитися від використання кривих порівняно малого радіуса, оскільки в пологих кривих вплив відцентрової сили на пасажирів невелике і може бути скомпенсована за рахунок конструктивних особливостей шляху. Так вчинили у Франції, запустивши в експлуатацію з 1981 року високошвидкісні потяги TGV [1 – 5]. Такий підхід не потребує кардинальної зміни конструкції транспортного засобу. Тим не менше, створення принципово нової інфраструктури транспортних колій вимагає досить значних капіталовкладень. По-друге, можна залишити в експлуатації існуючу мережу транспорту, вживши заходів по зміні її конструкції, що дозволяють підвищити швидкість проходження кривих за рахунок впровадження систем нахилу кузовів. Такий шлях представляється менш витратним, оскільки вводити нові транспортні засоби можна поступово, витісняючи існуючий у міру його фізичного та морального зносу.

Транспортні засоби з наклоняємими кузовами являються найменше затратною технологією для створення скоростного движенья на існуючих ділянках транспортних магістралей, що містять велику кількість кривих (залізниця, аеродроми та інше). В даний час такі приводи застосовуються на електропоїздах, експлуатуються в багатьох країнах світу, включаючи Австралію, Німеччину, Іспанію, Італію, Канаду, Китай, Норвегію, Португалію, Словенію, США, Фінляндію, Францію, Швейцарію, Швецію та Японію [1 – 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В якості приводу систем нахилу кузовів цих поїздів використовуються гідравлічні, пневматичні і електромеханічні системи. Гідравлічна система залежить від погодних умов, екологічно недосконала через

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

чного приводів (рис. 1) [6]. Для визначення робочих властивостей запропонованої системи необхідно розробити математичну модель такої системи нахилу кузова. Вона 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

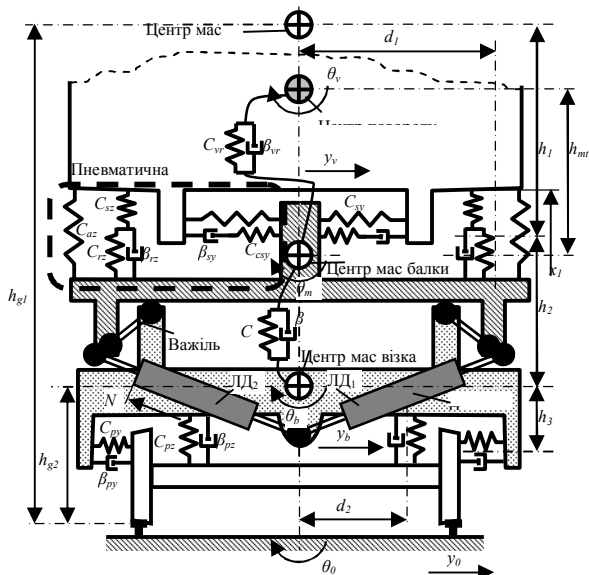


Рис. 1. Схема механічної частини системи нахилу кузова

Метою даної статті є розробка математичної моделі електромеханічної частини комбінованої пневматичної та електромеханічної системи нахилу кузова транспортного засобу.

Виклад основного матеріалу досліджень

Моделювання першого блоку розглянуто [1], а особливості третього блоку наведені у [7 – 10].

Другий блок відноситься до системи електромеханічного перетворення енергії. Вона, як уже згадувалося, підрозділяється на два блоки: лінійний двигун і напівпровідниковий перетворювач [1, 2].

Принципова схема системи електромеханічного перетворення енергії (СЕМПЕ) приведена на рис. 2, де U_{uc} – напруга джерела живлення; U_{VT} – напруга на ключах; U – напруга на електромагнітному двигуні; i_{uc} – струм джерела живлення; i_{uc} – струм інвертора; i_{VD} – струм діодів; i_{VT} – струм ключів; i_{di} – струм лінійного двигуна; R_d – обмежувач опір демпфуючого ланцюга; R – опір обмотки електромагнітного двигуна, який визначається кількістю її витків w ; C_d – ємність демпфуючого ланцюга; i_d – струм демпфуючого ланцюга; L – індуктивність електромагнітного двигуна.

Ескіз поперечного перерізу лінійного двигуна електромагнітного типу приведений на рис. 3.

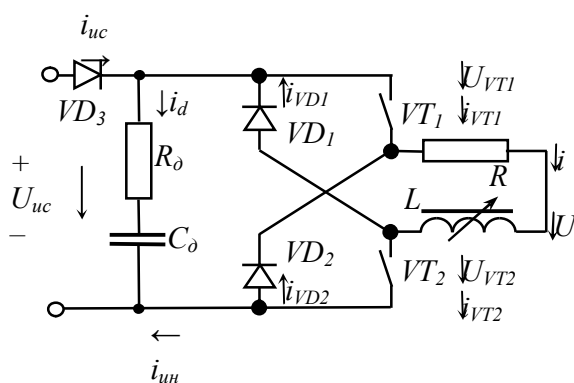


Рис. 2. Принципова схема СЕМПЕ

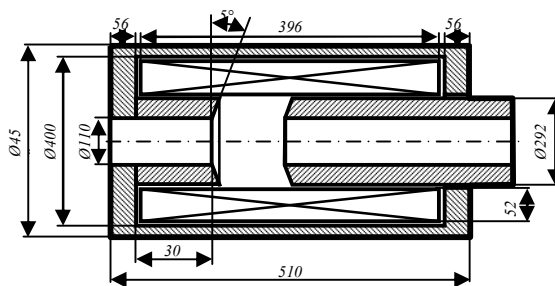


Рис. 3. Ескіз поперечного перерізу коаксіального лінійного двигуна постійного струму електромагнітного типу

Процеси електромеханічного перетворення енергії, що відбуваються в системі, описуються так:

$$\begin{cases} U = -e + iR; \\ -e = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial i / N = \text{const}} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial\Psi}{\partial N / i = \text{const}} \cdot \frac{dN}{dt}; \\ L = \frac{\partial\Psi}{\partial i / N = \text{const}}; \\ K_3 = \frac{\partial\Psi}{\partial N / i = \text{const}}. \end{cases} \quad (1)$$

В даному випадку коефіцієнт K_3 це протиположний ЕРС, обумовлена зміною координати N при постійності струму, - тобто ЕРС руху.

$$U = L \frac{di}{dt} + K_3 V_T + iR, \quad (2)$$

де $V_T = \frac{dN}{dt}$ – швидкість переміщення якоря.

Після приведення рівнянь (1) до форми завдання Коши, загальна система диференціальних рівнянь лінійного двигуна електромагнітного типу прийме вигляд

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U - iR - K_3 V_T}{L}; \\ \frac{dN}{dt} = V_T, \end{cases} \quad (3)$$

де $L = f(i, N)$; $K_3 = f(i, N)$.

Схема для розрахунку перетворювача приведена на рис. 4. Вона заснована на схемі [1]. Однак недоліком цієї схеми є те, що у режимі, при якому якор двигуна не рухається, тобто $V_T = 0$, двигун являє собою індуктивність, яка споживає значний реактивний струм від джерела живлення. Тому струм джерела у цій схемі має змінний характер, що може привести до негативних наслідків у допоміжних системах електропоїзду. Тому для усунення цього недоліку встановлено діод VD3. В такій схемі у час, коли від електродвигуна протікає зворотній струм (що спрямований зворотно напрузі на двигуні), він буде замикатися через ланцюг конденсатора С, що забезпечить його заряд. При протіканні прямого струму конденсатор розряджається через обмотку двигуна. Сумарний струм i , що протікає через обмотку двигуна, складається зі струму джерела живлення i_{uc} та конденсатору i_d . Тому у цьому режимі струм джерела зменшується.

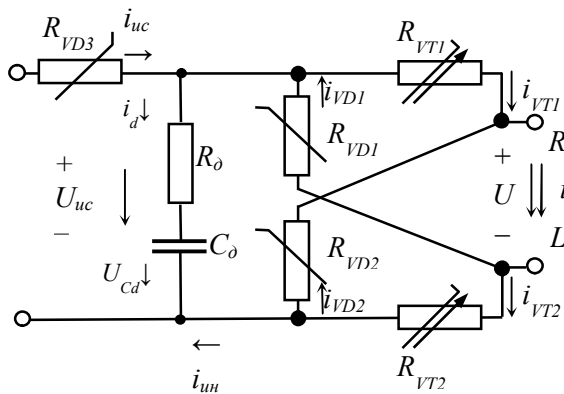


Рис. 4. Розрахункова схема перетворювача:
 R_{VD} – опори керованих резисторів - еквівалентів діодів, R_{VT} – опори керованих резисторів - еквівалентів ключів

Струми в гілках, відповідно до 1 закону Кірхгофа знаходяться так:

$$\begin{cases} i_{uc} + i_{VD1} - i_{VT1} - i_d = 0; \\ -i_{uc} + i_{VD2} + i_{VT2} + i_d = 0; \\ i_{VT1} + i_{VD2} - i = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Напруги в контурах по 2 закону Кірхгофа знаходяться з таких співвідношень:

$$\begin{cases} -U_{uc} + i_d R_d + U_{Cd} = 0; \\ -U_{uc} + i_{VT1} R_{VT1} + U + i_{VT2} R_{VT2} = 0; \\ i_d R_d + U_{Cd} + i_{VD2} R_{VD2} + U + i_{VD1} R_{VD1} = 0; \\ i_{VT1} R_{VT1} + U + i_{VD1} R_{VD1} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Напругу на конденсаторі можна визначити з наступного співвідношення

$$\frac{dU_{Cd}}{dt} = \frac{i_d}{C_d}. \quad (6)$$

У виразах (4, 5)

$$R_{VT1} = f(V_T); R_{VT2} = f(N, \theta_m); R_{VD1} = f(i_{VD1}); R_{VD2} = f(i_{VD2}); C_d, R_d, U_{uc} = \text{const}.$$

Показниками, що характеризують роботу СЕМПЕ, є сила, що розвивається електромагнітним приводом і швидкість руху якоря двигуна електромагнітного типу, а також максимальна напруга на ключах. Параметри, зміна яких зробить істотний вплив на вказані показники:

1. Характеристики коаксiального лiнiйного двигуна постійного струму електромагнітного типу: діаметр якоря; довжина опори якоря; кут нахилу її торцевої частини; діаметр та довжина твiрної статора; довжина і товщина обмотки; число її витків.

2. Характеристики електричного ланцюга СЕМПЕ: опір демпфуючого ланцюга; ємність демпфуючого ланцюга.

Для ідентифікації параметрів математичної моделі згідно з [1,2] проведемо комплекс цифрових експериментів по визначенню потокозчеплення обмотки якоря. Обрана оптимальна за розрахунками розділу 2 конструкція двигуна для куту нахилу 5° .

Лiнiйний двигун вибраної конструкції був змодельований і досліджений в середовищі femm [11]. При побудові моделі прийняті наступні основні допущення: магнітна система є аксіально-симетричною; матеріал корпусу і якоря лiнiйного двигуна - сталь Ст 3, обмотки - електротехнічна мідь; вихрові струми і гістерезис в магнітопроводі не враховуються; джерело живлення має властивості iдеального джерела електрорушiйної сили, ключі перетворювача мають iдеальну вольт-амперну характеристику.

Для отримання сімейства тягових характеристик двигуна електромагнітного типу, на мові lua була написана програма - скрипт, що автоматично варіює проміжок N в моделі лiнiйного двигуна від 0,1 до 96,1 мм з кроком 5 мм при зміні МДС в обмотці від 0 до 60000 А з кроком в 1000. Живляча напруга складала 600 В. Кількість витків – 175, що забезпечує встановлену щільність стуму згідно розділу 2, 10А/мм².

На кожному кроці розрахунку робився автоматичний розрахунок електромагнітного поля ЛЭМПЭ (рис. 5), вчислена величина тягової сили і потокозчеплення для поточних значень струму і проміжку поміщалося у файл end.xls для подальшої обробки. Величина сили вимірювалася шляхом iнтеграції по контуру якоря електромагнітного двигуна, а значення потокозчеплення - по контуру його обмотки.

Найбiльший iнтерес становить тягова характеристика, що найточніше відповідає кривій навантаження (рис. 6).

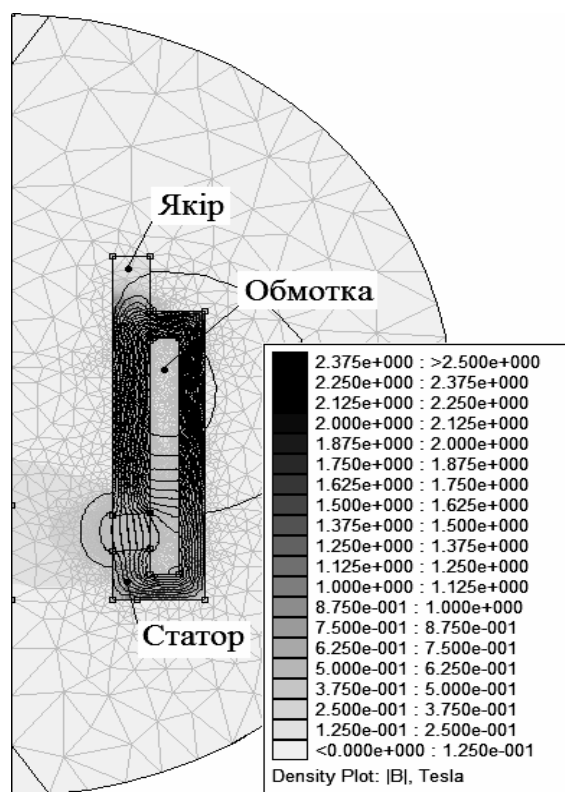
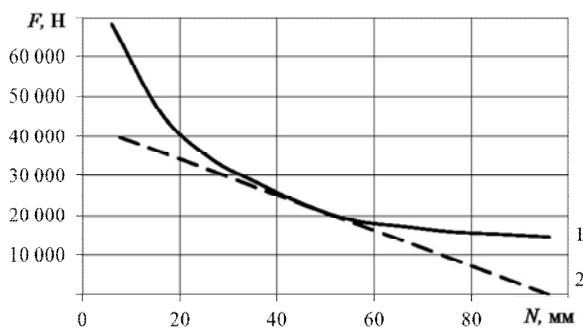


Рис. 5. FEMM-модель коаксіального лінійного двигуна постійного струму електромагнітного типу і результати розрахунку магнітного поля



1 – тягова при МДС 51000 А;
2 – навантажувальна

Рис. 6. Тягова та навантажувальна характеристики

Тягова характеристика, отримана для МДС обмотки в 51000 А торкається кривої навантаження, тобто забезпечує функціонування механізму на усій довжині ходу якоря.

Слід зазначити, що отримані в результаті числового експерименту природні тягові характеристики лінійного електромагнітного двигуна не можуть бути використані в імітаційній моделі безпосередньо, оскільки є дискретними даними для ряду значень проміжку N і струму в обмотці електромагнітного двигуна.

Для визначення безперервних функцій у будь-якій точці інтервалу варіювання струму і

проміжку пропонується апроксимувати функції потокозчеплення і електромагнітної сили поліномами Чебишева на множині рівновіддалених точок, використовуючи результати обчислювальних експериментів як початкові дані [12].

При цьому апроксимація потокозчеплення фази має вигляд

$$\Psi = \sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K \left(A_{jk} (MJ \cdot i + ZJ)^j \times \right. \\ \left. \times (MK \cdot N + ZK)^k \right), \quad (7)$$

де A_{jk} – коефіцієнт регресії полінома, апроксимуючого потокозчеплення;

MJ, MK – масштабні коефіцієнти по току і проміжку відповідно;

ZJ, ZK – зсуви по току і зазору відповідно;

J, K – степені апроксимуючого полінома по струму і проміжку відповідно.

Зробивши аналітичне диференціювання по струму (7), отримуємо коефіцієнт при протиЕРС, представлений в імітаційній моделі блоком ApproxProtivoEDS:

$$K = \sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^K \left(A_{jk} k (MJ \cdot i + ZJ)^{j-1} \times \right. \\ \left. \times (MK \cdot N + ZK)^{k-1} \right).$$

Зробивши аналітичне диференціювання по проміжку (7), отримуємо диференціальну індуктивність, представлену в імітаційній моделі блоком ApproxInduct:

$$K = \sum_{j=0}^J \sum_{k=1}^K \left(A_{jk} k (MJ \cdot i + ZJ)^{j-1} \times \right. \\ \left. \times (MK \cdot N + ZK)^{k-1} \right).$$

Електромагнітна сила апроксимована поліномом, що має аналогічний із (7) вигляд, він представлений в імітаційній моделі блоком ApproxSily:

$$F = \sum_{j=0}^{JF} \sum_{k=0}^{KF} \left(AF_{jk} (MJF \cdot i + ZJF)^j \times \right. \\ \left. \times (MKF \cdot N + ZKF)^k \right), \quad (8)$$

де AF_{jk} – коефіцієнт регресії полінома, що апроксимує силу;

MJF, MKF – масштабні коефіцієнти по струму і проміжку відповідно;

ZJF, ZKF – зсуви по току і зазору відповідно;

JF, KF – степені апроксимуючого полінома по струму і проміжку відповідно.

Згідно [1] вибрані наступні параметри апроксимуючого полінома.

$$J = 4 \text{ і } K = 9,$$

а функції сили:

$$JF = 7 \text{ і } KF = 9.$$

Висновки

1. Запропоновано математичну модель, 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.

2. 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 нахилється, а також роботу керованого пневматичного підвішування. Вона встановлює зв'язки геометричних, силових і електрофізичних параметрів з величинами, що характеризують якість і ефективність роботи як окремих механізмів, так і облаштування приводу нахилу кузова в цілому.

3. Особливістю цієї моделі є застосування методу кінцевих елементів для ідентифікації параметрів лінійного двигуна з подальшою апроксимацією поточкозчеплень на їх похідних поліномами Чебишева на безлічі рівновіддалених точок.

Список літератури

1. Якунин Д.И. *Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов скоростного подвижного состава* : дисс. ... канд. техн. наук / Д.И. Якунин. – Харьков, 2010. – 202 с.
2. Любарський Б.Г. *Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу* : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.22.09 – електротранспорт / Любарський Борис Григорович. – Харків : Національний технічний університет «ХПІ», 2014. – 368 с.
3. Корниенко В.В. *Высокоскоростной электрической транспорт. Мировой опыт* / В.В. Корниенко, В.И. Омеляненко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – 159 с.

4. *Поезда с наклоняемыми кузовами для скоростного пассажирского движения* / В.И. Омеляненко, Г.В. Кривякин, Д.И. Якунин, Е.С. Редченко // *Локомотив-информ.* – Харьков: Техностандарт, 2008. – №5. – С. 12-17.

5. *Развитие технологии наклона кузовов вагонов* [Электронный ресурс] // *Железные дороги мира*, 2001. – № 11. – Режим доступа до журн.: <http://css-rzd.ru/zdm/11-2001/01185-1.htm>.

6. Якунин Д.И. *Влияние наклона кузова вагона при движении по кривым участкам пути на взаимодействие колес с рельсами* / Д.И. Якунин, Ю.В. Макаренко // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна.* – Дніпропетр.: ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2009. – С. 248–251.

7. Єриця Б.Х. *Лінійний двигун для комбінованої електронепневматичної системи нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу* / Б.Х. Єриця, Д.І.Якунін // *Microcad* : Тези конф. – Х., 2014.

8. Макаренко Ю.В. *Усовершенствование пневматического рессорного подвешивания электропоезда путем применения регулятора положения кузова на основе мехатроники* : дисс. ... канд. техн. наук / Ю.В. Макаренко. – Х., 2014. – 170 с.

9. Berg M: *Modelling of springs and dampers for dynamic analysis of railvehicles - a pilot study* / M: Berg. – KTH, Stockholm 1994, ISBN KTH/FKT/FR- 94/51-SE.

10. Єриця Б.Х. *Развитие имитационного моделирования механизма наклона кузова с линейным электро-механическим преобразователем* / Б.Х. Єриця, Д.И. Якунин // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. – Х.: НТУ «ХПІ», 2010. – С. 92-97.

11. *Сайт femm.info* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.

12. *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 // *Электроинформ.* – Львов: ЕКОинформ, 2009. – С. 88–91.

Надійшла до редколегії 11.09.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Т. Доманський, Національний технічний університет ХПІ, Харків.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ КОМБИНИРОВАННОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА НАКЛОНА КУЗОВА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Б.Г. Любарский, Б.Х., Єриця, Д.И. Якунин

В научной статье рассматривается актуальная проблема создания транспортного средства с комбинированным пневматическим и электромеханическим приводом наклона кузова, что позволяет существенно повысить скорость движения на кривых участках. В работе создана математическая модель в виде совокупности дифференциальных уравнений, описывающих все узлы и звенья передачи мощности от источника электрической энергии к исполнительному механизму – наклоняемой балки, а также работы управляемого пневматического подвешивания. Она устанавливает связи геометрических, силовых и электрофизических параметров с величинами, характеризующими качество и эффективность работы как отдельных механизмов, так и устройства привода наклона кузова в целом.

Ключевые слова: комбинированный привод, наклон кузова, линейный двигатель, математическая модель.

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE COMBINED ELECTRO PNEUMATIC AND ELECTROMECHANICAL DRIVE TILTING OF THE VEHICLE BODY

B.G. Liubarskyi, B.Kh. Yeritsyan, D.I. Yakunin

In the scientific article the actual problem of creating a vehicle with a combined pneumatic and electromechanical drive tilting that can significantly increase the speed of movement in curves. In this paper a mathematical model as a set of differential equations describing all the nodes and links in power transmission from the power supply to the actuator - tilting beam, and the work managed air suspension. It establishes a connection geometry, power and electrical parameters with the values that characterize the quality and efficiency of individual mechanisms and tilting drive arrangement as a whole.

Keywords: combination drive, the inclination of the body, linear motor, the mathematical model.