

Якунін Д.І. – к.т.н., доц., E-mail:Dmytro.Iakunin@khpi.edu.ua,
(0000-0002-3995-3162)

Козьма В.О. – аспірант, тел. +380677339033;

E-mail: Volodymyr.Kozma@khpi.edu.ua, (0009-0004-7947-0415)

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

ВИЗНАЧЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СИСТЕМИ НАХИЛУ КУЗОВА ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Анотація. У статті розглянуто передумови процесу вибору параметрів лінійного електромеханічного перетворювача енергії (ЛЕПЕ) для системи нахилу кузова залізничного рухомого складу. Особлива увага приділяється визначенню необхідної сили для нахилу кузова на заданий кут та навантажувальних характеристик ЛЕПЕ. Задля досягнення цієї мети створена імітаційна модель, що дозволяє варіювати геометричні та фізичні параметри для отримання навантажувальних характеристик для різних конфігурацій реалізації механізму нахилу. Отримані навантажувальні характеристики використовуються для пошуку раціонального розташування лінійних двигунів у системі нахилу кузова.

Ключові слова: нахил кузовів, кут нахилу, імітаційна модель, навантажувальна характеристика, лінійний електромеханічний перетворювач енергії.

Iakunin D.I. - PhD, Associate Professor, E-mail:Dmytro.Iakunin@khpi.edu.ua,
(0000-0002-3995-3162)

Kozma V.O. – Post-graduate student, tel: +380677339033;

E-mail:Volodymyr.Kozma@khpi.edu.ua, (0009-0004-7947-0415)

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Kyrpychova str., 2,
Kharkiv, Ukraine, 61002

DETERMINATION OF LOAD CHARACTERISTICS OF A LINEAR ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTER FOR THE TILT SYSTEM OF RAILWAY ROLLING STOCK

Abstract. The article discusses the prerequisites for selecting the parameters of a Linear Electromechanical Energy Converter (LEEC) for the tilt system of railway rolling stock. Special attention is given to determining the required force to tilt the body to a specified angle and the load characteristics of the LEEC. To achieve this goal, a simulation model has been created that allows for the variation of geometric and physical parameters to obtain load characteristics for different configurations of the tilt mechanism. The obtained load characteristics are used to find the optimal placement of linear actuators in the tilt system.

Keywords: body tilting, tilt angle, simulation model, load characteristics, linear electromechanical energy converter.

Постановка проблеми. Залізнична мережа України по праву вважається однією з найбільш розгалужених у Європі. Її загальна протяжність складає 22050 км. Сьогодні залізничний транспорт здійснює 82% вантажних та 48% пасажирських перевезень від загального обсягу. Протягом року послугами залізниць користуються 400 мільйонів пасажирів [1].

Будівництво залізничних ліній в Україні розпочалося досить давно, тому для них характерна велика кількість кривих малого радіуса. Технічні параметри колій також залишаються відносно низькими, і в найближчій перспективі капітальна реконструкція цих ліній малоімовірна. Проте ці лінії відіграють важливу роль в економічному та соціальному розвитку регіонів, через які вони проходять. [2, 3]

Отже, доцільно звернути увагу на створення рухомого складу з нахилом кузовів, оскільки такі поїзди призначені для збільшення швидкості руху на кривих ділянках колії [4, 5]. Це дозволяє скоротити час подорожей і покращити транспортне обслуговування населення [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [7, 8] виявлено, що для приведення в дію механізму примусового нахилу кузова в сучасних поїздах використовуються гідравлічні, пневматичні, електрогідравлічні та електромеханічні системи. Найбільш поширеним у світовій практиці є гідравлічний привід. Порівняно з ним, меншою вартістю відзначається тільки пневматичний привід, оскільки він, як і гідравлічна система, може бути зібраний зі стандартних серійних компонентів. Обслуговування гідравлічного приводу є найбільш складним через його конструкцію, тому доцільніше використовувати електромеханічні або електрогідравлічні приводи. За масогабаритними показниками та простотою конструкції також лідирують електромеханічні та електрогідравлічні приводи. Їх швидкодія порівнянна з гідравлічним приводом і значно перевершує пневматичний привід [9].

Найбільше занепокоєння викликає той факт, що електромеханічний привід у разі несправності не забезпечує самоповернення в початкове положення, що може призвести до діагонального розвантаження колісних пар. Демпфування коливань у цьому приводі також є незадовільним [10].

Таким чином, широкому застосуванню електромеханічного приводу перешкоджає недостатнє демпфування та відсутність самоповернення, що зумовлено наявністю в його складі гвинтової пари. Це призводить до того, що перетворення електричної енергії в механічну відбувається опосередковано. Пряме перетворення електричної енергії в механічну енергію переміщення штока можна забезпечити, використовуючи в якості силового приводу лінійний електромеханічний перетворювач енергії (ЛЕПЕ). Маючи всі переваги електромеханічного приводу, така система буде позбавлена гвинтової пари і, відповідно, вищезазначених недоліків.

Постановка завдання.

При виборі типу ЛЕПЕ необхідно визначити, яку силу для нахилу кузова на заданий кут потрібно розвинути на його якорі, а також характер зміни цієї сили, тобто визначити навантажувальну характеристику лінійного двигуна. У зв'язку з цим у даній роботі було поставлено мету — визначити навантажувальну характеристику ЛЕПЕ $F_n(\theta)$, що приводить в рух систему нахилу кузова.

Постановка завдання. Мета даного дослідження полягає у вивченні сучасних підходів до управління бізнес-процесами в контексті інноваційного розвитку інтернет-торгівлі, а також аналізу впливу діджиталізації на ефективність і конкурентоспроможність підприємств. Результати цього дослідження можуть бути корисними для розробки стратегій розвитку інтернет-торгівлі та впровадження ефективних систем управління бізнес-процесами.

Для досягнення мети мають бути вирішені наступні задачі:

- створити зручну імітаційну модель, що дозволяє легко варіювати її геометричними та фізичними параметрами задля отримання навантажувальних характеристик різних конфігурацій рухомого складу.
- отримати за допомогою моделі навантажувальні характеристики для різного розміщення лінійних двигунів у системі нахилу кузова задля пошуку раціонального їх розташування.

Виклад основного матеріалу дослідження. В якості базової використано імітаційну модель, досліджену у роботах [11 – 14]. Але для заданої мети її

функціонал є надлишковим а процес моделювання відбувається надто повільно. Тому модель було значно спрощено та перероблено, а параметри елементів запропоновано подавати у вигляді зовнішнього файлу даних, що дозволяє оперативно варіювати параметрами моделі. Імітаційна модель була створена механізму нахилу кузова за допомогою програми Simulink, що є додатком до пакету MATLAB [12]. Моделювання механічної частини здійснювалося за допомогою модулів і компонентів SimMechanics, виклик імітації та передача варійованих параметрів виконувалися через стандартний m-файл програми Matlab:

```
clear all;
%Задаємо початкові координати
Grnd=[-600 500 0]; %Def Grnd=[1000 600 0] точка кріплення корпусу
ЛЕПЕ
Shtk=[-200 600 0]; %Def Shtk=[650 38 0] точка кріплення якоря ЛЕПЕ
ShVR=[400 350 0]; %Def ShVR=[400 350 0] Верхній шарнір правий
ShVL=[-ShVR(1) ShVR(2) ShVR(3)]; %Def ShVR=[-400 350 0] Верхній
шарнір лівий
ShNR=[650 38 0]; %Def ShNR=[650 38 0] Нижній шарнір правий
ShNL=[-ShNR(1) ShNR(2) ShNR(3)]; %Def ShNR=[-650 38 0] Нижній шарнір
лівий
CGR=(ShVR+ShNR)/2; %def CGR=[525 194 0] Центр мас правого важіля
CGL=(ShVL+ShNL)/2; %def CGL=[-525 194 0] Центр мас лівого важіля
% "Нульовая" довжина ЛЕМЕ по шарнірах:
LSht0=0.001*sqrt((Grnd(1)-Shtk(1))*(Grnd(1)-Shtk(1))+(Grnd(2)-
Shtk(2))*(Grnd(2)-Shtk(2)));
% Напівмаса кузова, кг
MKuz=30000;
% Старт моделі
sim('IzmSilV8');
%Robota=int(Syla,Hid)
S=0;
DeltaF=0;
DeltaN=0;
for i=1:(length(Hid)-1);
    if Syla(i) > 0
        DeltaF(i)=(Syla(i+1)+Syla(i))/2;
        DeltaN(i)=Hid(i+1)-Hid(i);
    else
        DeltaF(i)=0;
        DeltaN(i)=0;
    end
    S=S+(DeltaF(i)*DeltaN(i));
end
```

Спрощена імітаційна модель наведена на рис. 1. Вона включає підсистему механічної частини «Mechanizm», блок-схема якої наведена на рис. 2.

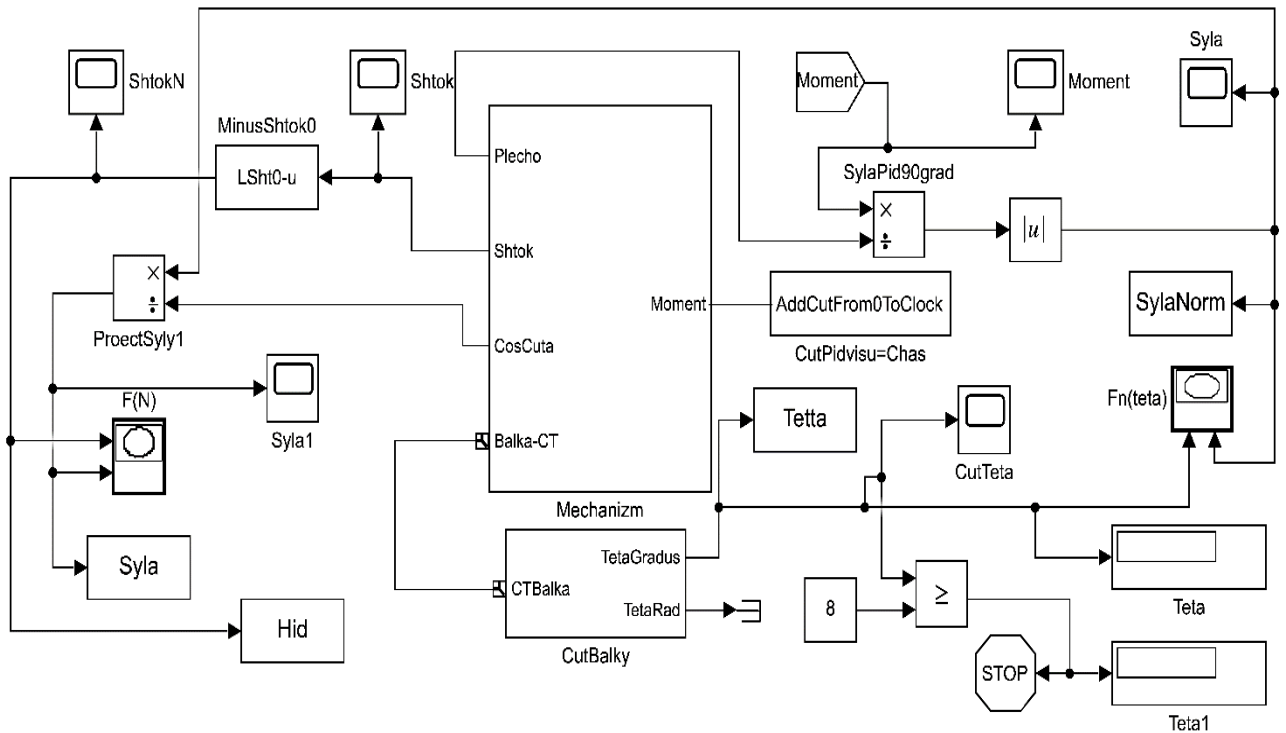


Рис. 1. Спрощена імітаційна модель системи нахилу кузова.

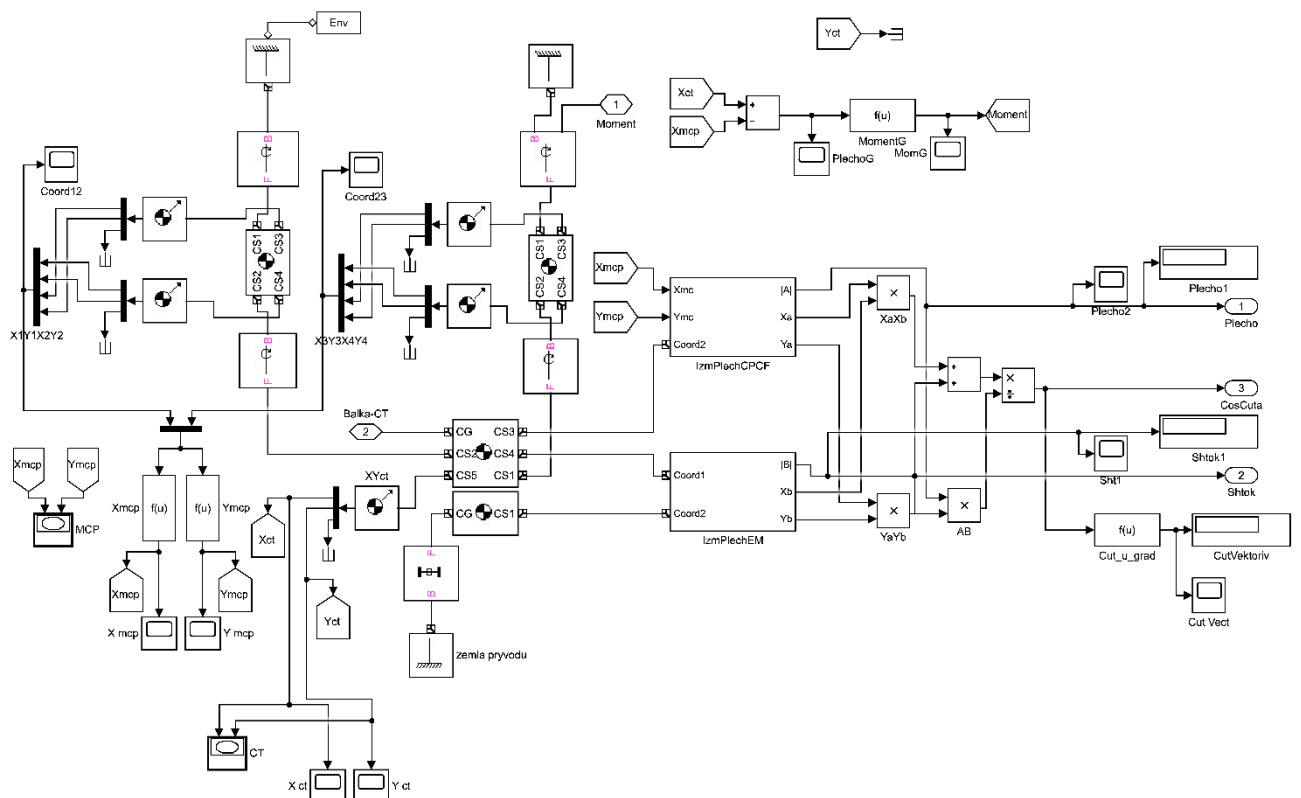


Рис. 2. Імітаційна модель механічної частини системи нахилу кузова.

Триланковий механізм нахилу представлений системою з трьох абсолютно жорстких тіл, з'єднаних за допомогою шарнірів, які забезпечують одну ступінь свободи – обертання навколо осі, перпендикулярної до площини механізму. Моментами тертя в них нехтуємо. До правого верхнього шарніра підключений РМС-порт Moment, який дозволяє як імітувати привід механізму в рух, так і вимірювати зусилля, що діє на шарнір.

Тіла, що імітують здвоєні важелі підвіски нахилиючої балки, мають наступні параметри. Маса 52 кг, моменти інерції (по осях x , y , z , відповідно) 2,88; 4,21; 1,52 $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, координати центра мас передаються через змінні CGL та CGR для лівого та правого важелів – відповідно. Координати зовнішніх портів CS1, якими важелі кріпляться до шарнірів рами візка, визначені координатами точок їх приєднання ShVL та ShVR. Координати зовнішніх портів CS2, якими важелі кріпляться до шарнірів балки, що нахилиється, задані змінними ShNL та ShNR для лівого та правого важелів – відповідно. Тіло, що моделює балку, що нахилиється, навантажену частиною ваги кузова, яка припадає на один привід механізму нахилу, має такі параметри. Маса передається через змінну MKuz, моменти інерції (по осях x , y , z , відповідно) $99,7\cdot 10^3$; $39,7\cdot 10^3$; $137\cdot 10^3$ $\text{кг}\cdot\text{м}^2$, центр мас у початковому положенні має координату (по осях x , y , z , відповідно) 0, 710, 0 мм у прийнятій системі координат. Фізичні параметри зазначених тіл – координати вузлових точок, центри мас та моменти інерції отримані з твердотільних моделей відповідних компонентів, побудованих у середовищі тривимірного моделювання SolidWorks. Розташування центру мас балки, що нахилиється, відповідає розташуванню "середнього" центру мас кузова, отриманого шляхом порівняння цього параметра у кількох типів поїздів з нахилом кузовів [15, 16].

Порт CG балки виведений в інтерфейс підсистеми за допомогою РМС-порту Valka-CT і використовується для зміни її кута нахилу θ . Порти CS3 та CS4 мають однакові координати, що задаються системною змінною Shtk і представляють точку приєднання до балки якоря силового приводу механізму нахилу.

Блок, що визначає розташування шарніра корпусу силового приводу, має координати, які задаються системною змінною Grnd. Такий підхід дозволяє легко варіювати координати розташування точок кріплення силового приводу для отримання сімейства навантажувальних кривих.

Підсистеми «IzmPlechCPCF» та «IzmPlechEM» вимірюють плече діючої на механізм зворотної гравітаційної сили та довжину виконавчого механізму по шарнірах, видаючи їх в інтерфейс підсистеми через порти Plecho і Shtok. Наступний математичний блок обчислює косинус кута між вектором сили і віссю силового приводу, видаючи його на порт CosCuta.

Порт Moment через механічний розгалужувач підключений до датчика-замірника моменту утримання в шарнірі та до підсистеми завдання кута повороту важеля підвіски. Параметри останнього обрані таким чином, щоб пов'язана з цим важелем балка, що нахиляється, проходила весь цікавий нам діапазон кутів нахилу: від -8° до 8° .

Вимірний момент ділиться на змінне плече, тим самим даючи величину сили, необхідної для утримання механізму під заданим кутом і діючої перпендикулярно до осі важеля підвіски. Отримана сила ділиться на обчислений косинус кута, визначаючи величину сили на якорі електромеханічного приводу. Початкова довжина якоря, обчислена в m-файлі і збережена в змінній LSht0, віднімається з поточної довжини штока, даючи тим самим величину ходу силового приводу.

За допомогою графопобудовника F(N) будується навантажувальна крива, яка представляє залежність сили на штоку приводу F_n від його ходу N . Ці ж параметри у вигляді масивів даних передаються в системні змінні SyLa і Hid для забезпечення можливості їх подальшого аналізу.

Імітаційна модель також оснащена деякими допоміжними компонентами, призначеними для проведення налагодження і контролю її працездатності. Так, підсистема CutBalky, вхід якої представлений РМС-портом СТBalka, видає на вихідний порт TetaGradus вимірний кут нахилу проміжної балки механізму нахилу, що підключається до допоміжного графопобудовника Fn(teta), який

відображає залежність сили F_H від кута θ . До моделі також підключено кілька віртуальних осцилографів, що записують поточні параметри.

Модель дозволяє демонструвати просту візуалізацію шарнірно-стрижневого механізму (рис. 3) та показувати зміни його конфігурації в часовому вимірі, що суттєво спрощує процес виявлення можливих помилок у моделюванні.

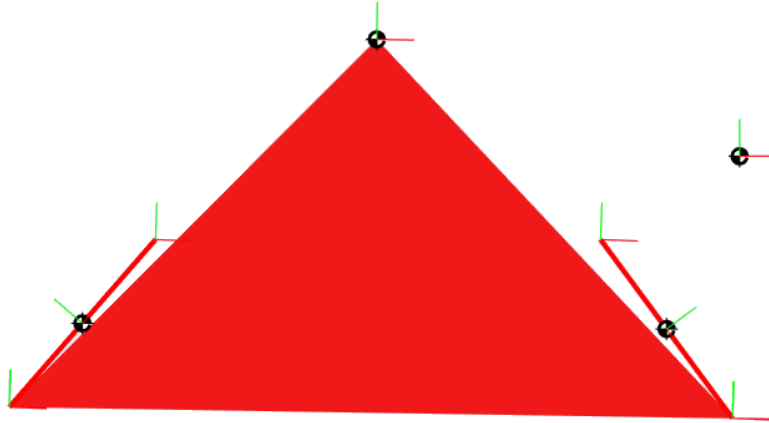


Рис. 3. Візуалізація шарнірно-стрижневого механізму.

Робота імітаційної моделі призводить до створення графіків навантажувальних характеристик, які відповідають різним конфігураціям досліджуваного механізму. Наприклад, на рис. 4 наведені навантажувальні характеристики для декількох розташувань ЛЕПЕ.

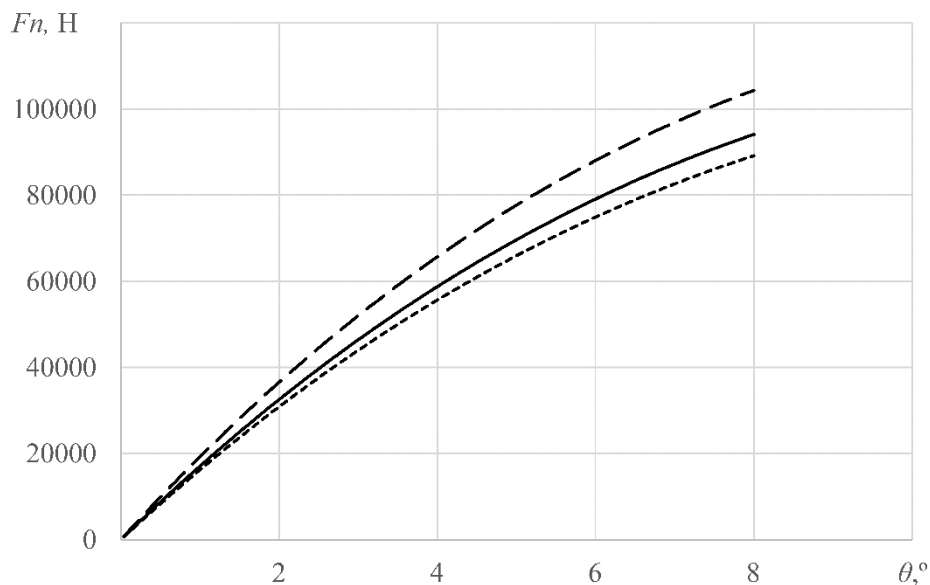


Рис. 4. Навантажувальні характеристики для декількох розташувань ЛЕПЕ: суцільна лінія для $Shtk=[600\ 38\ 0]$; пунктирна для $Shtk=[750\ 38\ 0]$; цяткова для $Shtk=[500\ 38\ 0]$

Розроблена авторами модель дозволяє побудувати залежності сили, що її розвиває лінійний двигун, від ходу його якоря. Така інформація є необхідною для подальшого обрання раціональної конфігурації ЛЕПЕ для поточного його розташування.

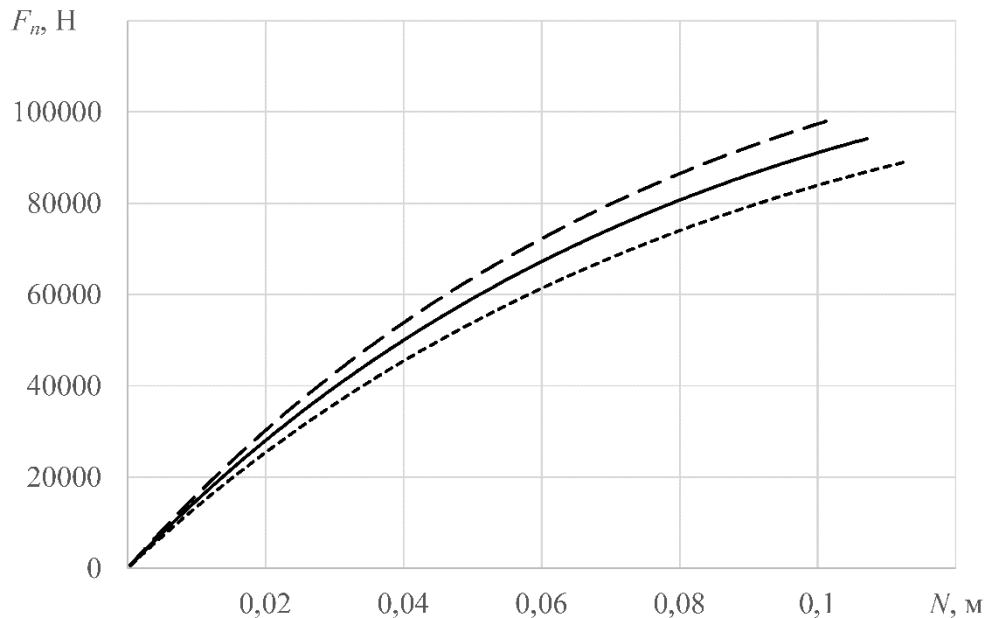


Рис. 5. Залежність навантажувальної сили) від ходу штока N (м) при нахилі кузова на кут $\theta = 0 \dots 8^\circ$ для декількох розташувань ЛЕПЕ: суцільна лінія для $Shtk=[650 \ 38 \ 0]$; пунктирна для $Shtk=[700 \ 38 \ 0]$; цяткова для $Shtk=[550 \ 38 \ 0]$

Висновок.

Створено імітаційну модель, яка дозволяє оцінити вплив параметрів механізму нахилу кузова на його характеристики, зокрема максимальне значення навантажувальної сили F_n та форму навантажувальної кривої.

Вибір раціональних параметрів електромеханічного перетворювача енергії зумовлюється ступенем наближення його тягової характеристики до однієї з навантажувальних характеристик механізму.

Список використаних джерел

1. <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zaliznici.html>
2. https://www.uz.gov.ua/about/general_information/history/
3. Kurhan, M. B. (2015). *Predposylki sozdaniya vysokoskorostnykh magistralej v Ukraine*. Ukrainian Railways, 5-6 (23-24), 16-21.
4. Kurhan, M. B., Korzhenevych, I. P., & Arsonov, V. V. (2006). Organization of high-speed traffic with the use of rolling stock with a forced tilt body cars. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 11, 50-59.

5. Kapitsa, M. I., Bobyr, D. V., & Desiak, A. Y. (2017). Determining permissible speed of tilting train in curved track. *Science and Transport Progress*, (4(70)), 29–40. <https://doi.org/10.15802/stp2017/109537>
6. Якунін Д.І. Моделювання комбінованої системи нахилу кузова швидкісного рухомого складу залізничного транспорту / Б. Х. Єрціян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Східноєвропейський журнал передових технологій.– Харків, 2016.– №2/9(80).– С. 4-17.
7. Єрціян Б. Х. Математична модель пневматичної частини комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу [Текст] / Б. Х. Єрціян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 10. – С. 200-204.
8. Любарський Б. Г. Математична модель електромеханічної частини комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу [Текст] / Б. Г. Любарський, Б. Х. Єрціян, Д. І. Якунін // Системи обробки інформації. – 2015. – Вип. 11. – С. 50-54.
9. Shripad Shashikant Chopade (2017). High speed tilting train technology. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Volume: 04 Issue: 12. P. 512-520.
10. Persson, Rickard. (2008). Tilting trains : Technology, benefits and motion sickness.
11. Єрціян Б. Х. Імітаційна модель комбінованого пневматичного та електромеханічного приводу нахилу кузова транспортного засобу [Текст] / Б. Х. Єрціян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2015. – Вип. 4. – С. 97–103.
12. Єрціян Б. Х. Імітаційне моделювання комбінованого приводу нахилу кузова швидкісного електропоїзду [Текст] / Б. Х. Єрціян, Б. Г. Любарський, Д. І. Якунін // Механіка та машинобудування. – 2015. – № 1. – С. 48–55.
13. Любарський Б. Г. Оптимізація параметрів лінійного двигуна нахилу кузова транспортних засобів [Текст] / Б. Г. Любарський, Б. Х. Єрціян, Д. І. Якунін, М. Л. Глебова // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – 2015. – № 41. – С. 58–66.
14. Єрціян Б.Х. Задача аналізу оптимізації геометричних розмірів лінійного двигуна нахилу кузова швидкісного електрорухомого складу / Б.Х. Єрціян, Б.Г. Любарський, Д.І. Якунін // Інформаційно-екруючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 5 (114). – С. 7–11.
15. Ozulu, A., Liubarskyi, B., Iakunin, D., & Dubinina, O. (2023). Synthesis of an electromechanical system of body tilt and recuperation of vibration energy for a high-speed electric train. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1 (125)), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288897>
16. Bodnar, B. Y., Nechaiev, Y. H., & Bobyr, D. V. (2009). *Teoriia ta konstruktsiia lokomotyviv. Ekipazhna chastyna [Manual]*. Dnipropetrovsk: PP «Lira LTD».

References.

1. <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pro-ukrainski-zalznici.html>
2. https://www.uz.gov.ua/about/general_information/history/
3. Kurhan, M. B. (2015). *Predposylki sozdaniya vysokoskorostnykh magistralei v Ukraine. Ukrainian Railways*, 5-6 (23-24), 16-21.
4. Kurhan, M. B., Korzhenevych, I. P., & Arsonov, V. V. (2006). Organization of high-speed traffic with the use of rolling stock with a forced tilt body cars. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 11, 50-59.
5. Kapitsa, M. I., Bobyr, D. V., & Desiak, A. Y. (2017). Determining permissible speed of tilting
6. tilting trains : Technology, benefits and motion sickness.

7. Yeritsian B. Kh. Imitatsiina model kombinovanoho pnevmatichnoho ta elektromekhanichnoho pryvodu nakhyly kuzova transportnoho zasobu [Tekst] / B. Kh. Yeritsian, B. H. Liubarskyi, D. I. Iakunin // Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl. – 2015. – Vyp. 4. – S. 97–103.
8. Yeritsian B. Kh. Imitatsiine modeliuвання kombinovanoho pryvodu nakhyly kuzova shvydkisnoho elektroizdu [Tekst] / B. Kh. Yeritsian, B. H. Liubarskyi, D. I. Iakunin // Mekhanika ta mashynobuduvannya. – 2015. – № 1. – S. 48–55.
9. Liubarskyi B. H. Optyimizatsiia parametriv liniinoho dvyhuna nakhyly kuzova transportnykh zasobiv [Tekst] / B. H. Liubarskyi, B. Kh. Yeritsian, D. I. Yakunin, M. L. Hliebova // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". – 2015. – № 41. – S. 58–66.
10. Yeritsian B. Ktrain in curved track. Science and Transport Progress, (4(70), 29–40. <https://doi.org/10.15802/stp2017/109537>
11. Iakunin D. I. Modeliuвання kombinovanoi systemy nakhyly kuzovu shvydkisnoho rukhomoho skladu zaliznychnoho transportu / B. Kh. Yeritsian, B. H. Liubarskyi, D. I. Iakunin // Skhidnoievropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii.– Kharkiv, 2016.– №2/9(80).– S. 4-17.
12. Yeritsian B. Kh. Matematychna model pnevmatichnoi chastyny kombinovanoho pnevmatichnoho ta elektromekhanichnoho pryvodu nakhyly kuzova transportnoho zasobu [Tekst] / B. Kh. Yeritsian, B. H. Liubarskyi, D. I. Iakunin // Systemy obrobky informatsii. – 2015. – Vyp. 10. – S. 200-204.
13. Liubarskyi B. H. Matematychna model elektromekhanichnoi chastyny kombinovanoho pnevmatichnoho ta elektromekhanichnoho pryvodu nakhyly kuzova transportnoho zasobu [Tekst] / B. H. Liubarskyi, B. Kh. Yeritsian, D. I. Iakunin // Systemy obrobky informatsii. – 2015. – Vyp. 11. – S. 50-54.
14. Shripad Shashikant Chopade (2017). High speed tilting train technology. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 04 Issue: 12. P. 512-520.
15. Persson, Rickard. (2008). Th. Zadacha analizu optyimizatsii heometrychnykh rozmiriv liniinoho dvyhuna nakhyly kuzova shvydkisnoho elektrorukhomoho skladu / B. Kh. Yeritsian, B. H. Liubarskyi, D. I. Iakunin // Informatsiino-ekruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti. – 2015. – № 5 (114). – S. 7–11.
16. Ozulu, A., Liubarskyi, B., Iakunin, D., & Dubinina, O. (2023). Synthesis of an electromechanical system of body tilt and recuperation of vibration energy for a high-speed electric train. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(1 (125), 6–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288897>
17. Bodnar, B. Y., Nechaiev, Y. H., & Bobyr, D. V. (2009). Teoriia ta konstruktsiia lokomotyviv. Ekipazhna chastyna [Manual]. Dnipropetrovsk: PP «Lira LTD».

Надійшла до редакції 17.04.2024.