

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

**РОЖКОВ СЕРГІЙ ПЕТРОВИЧ**



**УДК 629.3.027.3, 681.5.015**

**РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АДАПТИВНОЮ ПІДВІСКОЮ  
АВТОМОБІЛЯ З УРАХУВАННЯМ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Бажинов Олексій Васильович**,  
Харківський національний  
автомобільно-дорожній університет,  
завідувач кафедри автомобільної електроніки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ларін Олександр Миколайович**,  
Національний університет цивільного захисту України,  
професор кафедри інженерної та аварійно-рятувальної  
техніки;

кандидат технічних наук, доцент  
**Сергієнко Микола Єгорович**,  
Національний технічний університет «ХПІ», професор  
кафедри автомобіле- і тракторобудування

Захист відбудеться «08» червня 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.059.02 при Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Петровського, 25.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, Україна, м. Харків, вул. Петровського, 25.

Автореферат розісланий «07» травня 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



В.М. Павленко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним з шляхів підвищення ефективності використання енергії на транспорті є створення автомобіля з можливістю ефективно керувати витратами та перетворенням енергії в усіх його системах.

Підвіска – система, яка впливає на плавність руху автомобіля та є одним з джерел втрат енергії, через перетворення енергії коливань автомобіля в тепло, яке безповоротно розсіюється у навколишньому середовищі. Енергоефективна підвіска передбачає можливість керування плавністю ходу та, одночасно, здійснювати рекуперацію енергії коливань автомобіля.

Використання керованої підвіски повинне призвести до зменшення енерговитрат на рух транспортного засобу. Для автомобілів з традиційною та гібридною силовою установкою система керування підвіскою дозволяє збільшувати плавність ходу у різних дорожніх умовах та здійснювати рекуперацію енергії коливань. Для автомобілів з електричною силовою установкою, крім підвищення експлуатаційної швидкості, вона дозволить збільшити запас ходу. Таким чином, створення системи керування підвіскою є актуальною задачею, вирішення якої є одним з факторів підвищення плавності ходу та енергоефективності автомобіля.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконана згідно до «Транспортної стратегії України на період до 2020 року», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. № 2174-р, «Концепції розвитку транспортно-дорожнього комплексу України на середньостроковий період і до 2020 року», а також «Концепції державної цільової програми розвитку автомобільного транспорту до 2015 року».

### **Мета та задачі дослідження.**

Метою даних досліджень є підвищення енергоефективності автомобіля, плавності хода та рекуперація енергії коливань за рахунок керування адаптивною підвіскою в залежності від умов експлуатації.

Досягнення мети досліджень передбачає вирішення наступних задач:

- провести аналіз сучасних адаптивних підвісок, з точки зору підвищення плавності ходу та енергоефективності.
- удосконалити математичну модель коливань центру мас автомобіля з врахуванням впливу фазової затримки коливань задньої вісі відносно передньої.
- здійснити вибір типу та розробити конструкцію виконавчого пристрою керованої підвіски та провести експериментальні дослідження з метою отримання робочих характеристик пристрою.
- розробити алгоритм керування системою, який забезпечує потрібну плавність ходу та рекуперативний режим роботи підвіски, та обрати архітектуру системи, яка дозволяє реалізувати розроблений алгоритм роботи.

– провести імітаційне моделювання з метою підтвердження теоретичних досліджень, пов'язаних з покращенням плавності ходу та підвищенням енергоефективності.

**Об'єкт дослідження** – процес керування електромагнітним амортизатором (ЕМА) в залежності від дорожніх умов.

**Предметом дослідження** є методи та засоби реалізації адаптивної системи керування підвіскою автомобіля.

**Методи дослідження.** В теоретичних дослідженнях використовувалися теорія диференціальних рівнянь, операторне перетворення Лапласа, спектральний аналіз та статистична динаміка. Результати експериментальних досліджень оброблялися за допомогою метода найменших квадратів. Для оцінки роботи системи використовувалося імітаційне моделювання в середовищі Матлаб.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

– вперше при побудові математичної моделі вертикальних коливань автомобіля враховано вплив фазової затримки коливань задньої вісі відносно передньої на коливання центру мас, й отримані аналітичні залежності вертикальних прискорень центру мас автомобіля від впливу дорожньої поверхні на вісі;

– розроблено підхід до прийняття рішення відносно керування підвіскою автомобіля на основі удосконаленої математичної моделі;

– удосконалені конструкція електричної циліндричної лінійної машини (ЦЛМ) в якості ЕМА та спосіб керування нею в активному та пасивному режимах;

– доведено покращення плавності ходу та енергоефективності автомобіля за рахунок керування адаптивною підвіскою з рекуперативними можливостями.

**Практична значимість отриманих результатів.**

Розроблена математична модель коливань центра мас автомобіля дозволяє розрахувати динамічні властивості підвіски автомобіля при проектуванні та виробництві нових автомобілів, а також при розробці систем керування підвіскою.

Розроблений ЕМА може бути використаний, як керований демпфуючий елемент з функцією енергозбереження, на широкому спектрі автотранспортних засобів.

Запропонована інтелектуальна система керування підвіскою автомобіля дозволяє реалізувати алгоритми адаптивного керування ЕМА для забезпечення нормативної плавності ходу та підвищення енергоефективності автомобіля за рахунок рекуперації електричної енергії у бортову мережу та економії палива.

Практична цінність роботи підтверджена актами про впровадження результатів дисертаційної роботи від 29.01.2015 р. на ПрАТ «Хлібзавод «Салтівський» (транспортно-експлуатаційний цех), від 06.02.2015 р. на ТОВ «Корпорація Інженерний Центр Техноарт», від 11.02.2015 р. на Транспортно-експедиційна компанія ТОВ «ТЕК-11».

### **Особистий внесок здобувача.**

Теоретичні та експериментальні дослідження, що представлені до захисту, отримані особисто автором та викладені в трьох роботах опублікованих самостійно та дев'яти зі співавторами [1-12], а саме: аналіз потенційних можливостей по використанню додаткового електротехнічного обладнання на автомобілі [1]; аналіз та перетворення робочих характеристик пневматичного амортизатора з магнітною рідиною [2]; дослідження методів ідентифікації динамічних систем [3]; розрахунок потужності дисипативних сил, які діють у пасивній підвісці [4]; огляд існуючих типів підвісок та формування критеріїв вибору енергоефективної конструкції [5, 10]; аналіз коливань центру мас автомобіля та наступний комп'ютерний аналіз оптимального співвідношення динамічних параметрів підвіски [11, 6]; побудова АЧХ коливань центру мас автомобіля з використанням вдосконаленої математичної моделі [7]; огляд актуаторів для використання в електромагнітній підвісці [8]; моделювання розподілу магнітного поля квазіХалбах-масива у пакеті FEMM [12]; розробка методики дослідження робочих характеристик ЕМА [9].

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні результати дисертаційної роботи було викладено та схвалено на конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2012 р.), II-й міжнародній інтернет-конференції «Мехатроника транспортных средств и технологических машин» (Росія, м. Губкін, 2012 р.), Міжнародній науково-практичній конференції студентів і молодих учених вищих технічних навчальних закладів «Інноваційні процеси та технології. Шляхи їхньої реалізації в автомобільній, дорожньо-будівельній, транспортній, природоохоронній й освітній галузях» (м. Харків, 2013 р.), XVI-й міжнародній науково-технічній конференції «Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы» (м. Севастополь, 2013 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2013 р.), III-й міжнародній науково-технічній конференції «Автомобиль и электроника. Современные технологии» (м. Харків, 2013 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2014 р.), V-ій міжнародній науково-технічній інтернет-конференції «Новітні технології в електроенергетиці» (м. Харків, 2015 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2015 р.)

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 12 наукових праць, 9 з яких у фахових виданнях, в тому числі 5 в електронних виданнях та 2 статті у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних, 3 тези у збірниках доповідей наукових конференцій, одна з яких закордонна.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний об'єм дисертації складає 184 сторінки, в тому числі 52 рисунки, 12 таблиць, 4 додатки, список використаних джерел нараховує 105 найменування на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

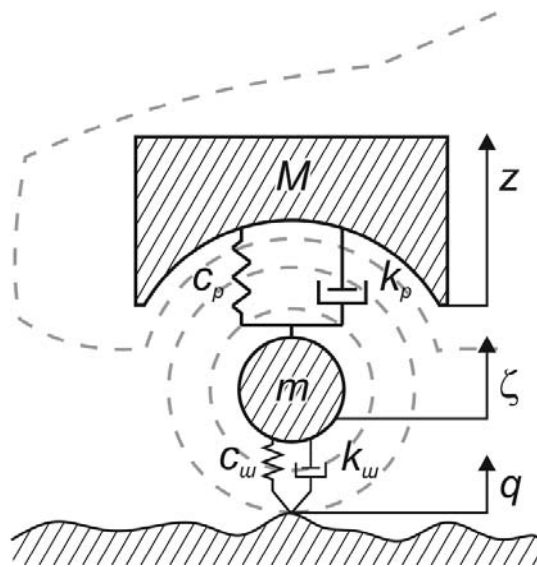
У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет досліджень, описано основні методи досліджень і зв'язок науковими програмами, планами, темами. Викладені основні положення наукової новизни і практичної цінності, апробації і публікації результатів дисертації.

У **першому розділі** сформульовані критерії вибору енергоефективної підвіски. Зроблено аналітичний огляд існуючих типів підвісок та зроблено висновки про їх енергоефективність.

Проведений аналіз показав, що найбільш відповідною до критеріїв ефективності використання енергії є електромагнітна підвіска на базі циліндричної лінійної машини (ЦЛМ), як така, що забезпечує керований опір амортизатора та має рекуперативні можливості.

Виходячи зі сказаного, сформульовані мета і основні задачі дослідження, визначено загальний підхід до вирішення поставлених задач.

У **другому розділі** спираючись на наукові праці таких вчених, як Р. В. Ротенберг, М. Н. Яценко, Я. М. Певзнер, А. О. Силаєв, А. А. Хачатуров, М. Я. Говорущенко, Є. Є. Александров було проведено теоретичний аналіз коливань автомобіля та виконати математичне моделювання. Обрано розрахункову схему (рис. 1) та побудовано математичну модель коливань автомобіля (1).



$M$  – підресорена маса;  $m$  – непідресорена маса;  $c_p$  – жорсткість пружного елемента;  $k_p$  – коефіцієнт опору амортизатора;  $c_{ш}$  – жорсткість шини;

$k_{ш}$  – коефіцієнт опору шини;  $z$  – переміщення підресореної маси;

$\zeta$  – переміщення непідресореної маси;  $q$  – збурюючий вплив

Рисунок 1 – Двомасова розрахункова схема

$$\begin{cases} \ddot{z}(t) + 2h_0\dot{z}(t) + \omega_0^2 z(t) - 2h_0\dot{\zeta}(t) - \omega_0^2 \zeta(t) = 0 \\ \ddot{\zeta}(t) + 2h_{k0}\dot{\zeta}(t) + \omega_k^2 \zeta(t) - 2h_{k0}\dot{z}(t) - \bar{\omega}_0^2 z(t) = 2\bar{h}_{k0}\dot{q}(t) + \bar{\omega}_k^2 q(t), \end{cases} \quad (1)$$

при  $\omega_0^2 = \frac{2c_p}{M}$ ,  $\omega_k^2 = \frac{2(c_{ш} + c_p)}{m}$ ,  $\bar{\omega}_0^2 = \frac{2c_p}{m}$ ,  $\bar{\omega}_k^2 = \frac{2c_{ш}}{m}$  – квадрати парціальних частот;

$$h_0 = \frac{k_p}{M}, \quad h_{k0} = \frac{k_p + k_{ш}}{m}, \quad \bar{h}_{k0} = \frac{k_{ш}}{m} \quad \text{– парціальні значення затухання.}$$

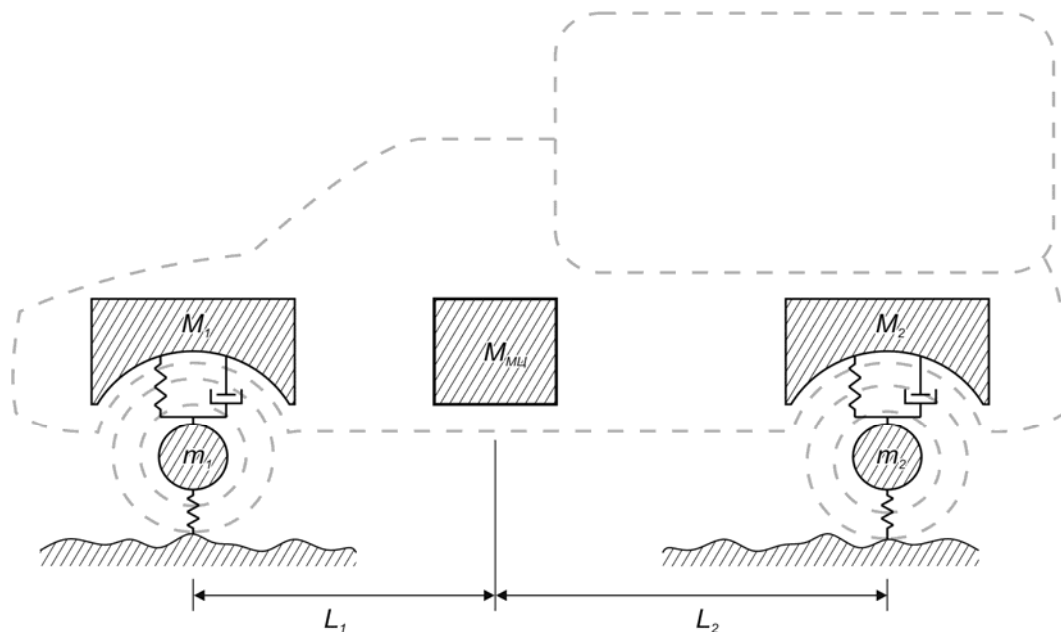
Для врахування впливу коливань обох осей на центр мас автомобіля, у вираз для гармонійного збурюючого впливу було введено кут фазової затримки  $\phi$ , що враховує запізнення початку впливу коливань другої осі на центр мас:

$$q(t) = q_0(1 - \cos(\omega t + \phi)), \quad (2)$$

$$\text{при } \phi = \frac{2\pi l}{s},$$

де  $l$  – база автомобіля;  
 $s$  – довжина нерівності.

Такий підхід є подальшим розвиненням моделі коливань автомобіля запропонованої в працях проф. Р.В. Ротенберга. Система рівнянь (1) була вирішена для нового вигляду збурюючого впливу (2). Рішення для переміщення (3), швидкості (4) та прискорення (5) центру мас (рис. 2) були отримані як сума рішень для кожної з осей, з врахуванням коефіцієнтів впливу коливань осей на центр мас:



$l_1$  – відстань від передньої вісі до центру мас;  
 $l_2$  – відстань від задньої вісі до центру мас  
 Рисунок 2 – Відстань до центру мас автомобіля

$$z_m(t) = k_{p1}z_1(t) + k_{p2}z_2(t), \quad (3)$$

$$\dot{z}_m(t) = k_{p1}\dot{z}_1(t) + k_{p2}\dot{z}_2(t), \quad (4)$$

$$\ddot{z}_m(t) = k_{p1}\ddot{z}_1(t) + k_{p2}\ddot{z}_2(t), \quad (5)$$

при  $k_{p1} = \frac{l_2}{l_1 + l_2}$  та  $k_{p2} = \frac{l_1}{l_1 + l_2}$ ,

де  $k_{p1}$ ,  $k_{p2}$  – коефіцієнти впливу коливань осей на коливання центру мас.

На основі отриманих теоретичних результатів, було проведено математичного моделювання та побудовані амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) коливань центру мас дослідного автомобіля для швидкості 10 м/с (рис. 3), криві мають полімодальний вигляд.

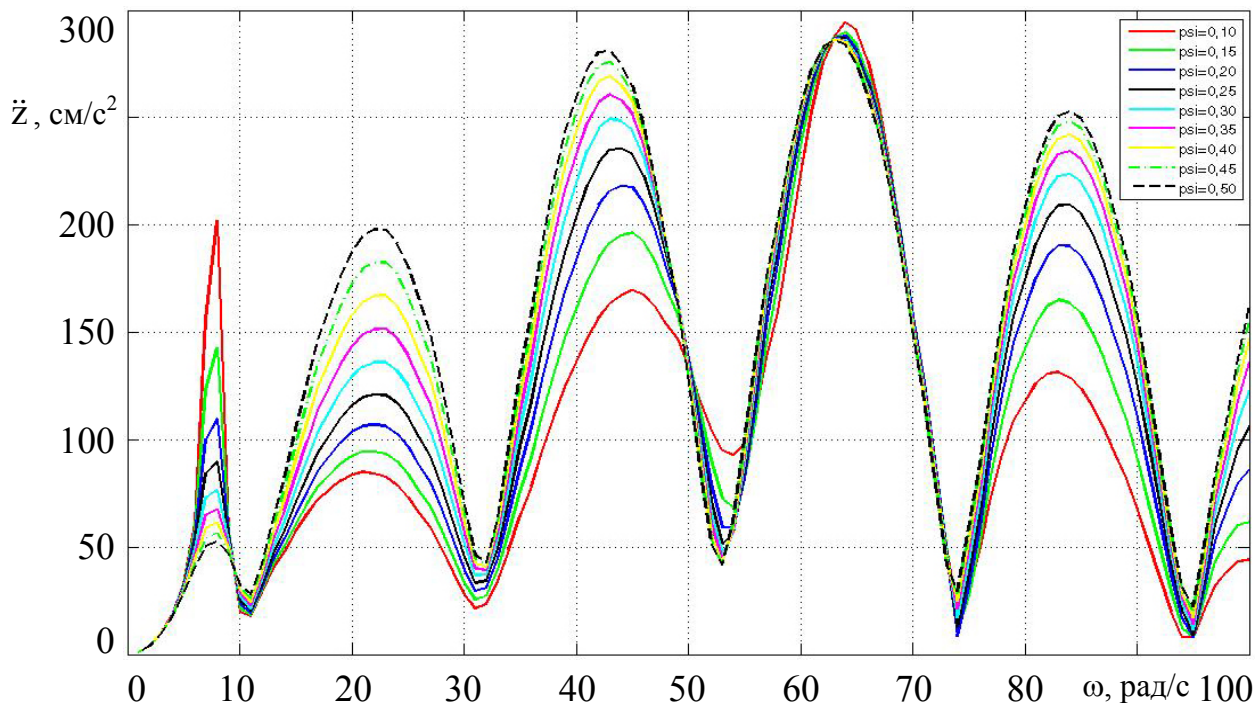


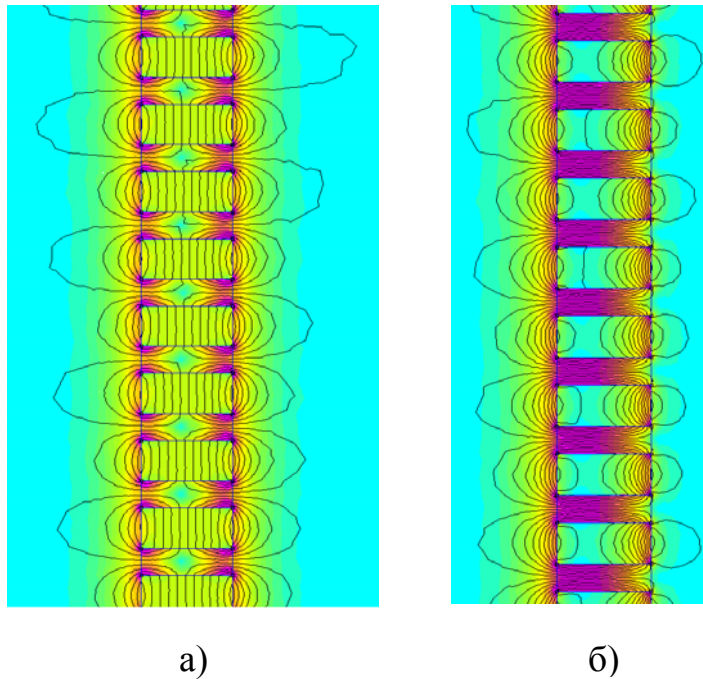
Рисунок 3 – АЧХ для центру мас при швидкості автомобіля 10 м/с

Аналіз АЧХ показав залежність кількості, положення та величини екстремумів від швидкості руху автомобіля та відносного коефіцієнта затування коливань осей  $\psi$ . Аналіз впливу відносного коефіцієнта затування коливань на рівень прискорень коливань вказує на необхідність використання у конструкції підвіски виконавчого пристрою зі змінним коефіцієнтом опору амортизатору.

У **третьому розділі** сформульовано основні вимоги до виконавчого пристрою електромагнітної підвіски – електромагнітного амортизатора (ЕМА) на базі трифазної циліндричної лінійної машини на постійних магнітах (ЦЛМ). Розглянуто основні типи конструкції ЦЛМ, основні відмінності яких полягають: у топології взаємного розташування магнітної системи та обмоточної частини; способі укладення трифазної обмотки; типі магнітної

системи; співвідношенні магнітних та електричних полюсів. Базуючись на цих даних було зроблено висновки про найбільш привабливу конструкцію ЦЛМ в якості ЕМА.

ЕМА представляє собою ЦЛМ з зовнішнім розташування магнітів, трифазною комбінованою обмоткою, та співвідношенням електричних та магнітних полюсів 3 до 4, що забезпечує найкращі показники щільності сили на штоці серед ЦЛМ з аналогічними геометричними показниками. В якості магнітної системи було обрано квазі-Халбах магнітну структуру, яка має кращі енергетичні показники порівняно з традиційною та утворює більш рівномірне магнітне поле (рис. 4).



а – традиційна збірка; б – збірка Халбаха

Рисунок 4 – Моделювання традиційної магнітної збірки та збірки Халбаха

Це дозволило підсилити індукцію магнітної системи та сконцентрувати магнітне поле всередині циліндричної магнітної збірки.

Виходячи з обраної конструкції ЦЛМ було побудовано математичну модель. Так як система представляє собою повністю симетричну систему, то має сенс розглядати одну фазу. Еквівалентна схема фази ЦЛМ зображена на рис. 5.

Для цього контуру можна записати

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = e(t) + u(t), \quad (6)$$

де  $L$  – індуктивність контуру;  
 $i(t)$  – струм у контурі;

$R$  – активний опір контуру;  
 $e(t)$  – ЕРС індукції;  
 при  $u(t)=k_{\text{ЕРС}}e(t)$  – джерело прикладеної до обмоток напруги пропорційної ЕРС індукції,  
 де  $k_{\text{ЕРС}}$  – коефіцієнт підсилення ЕРС індукції.

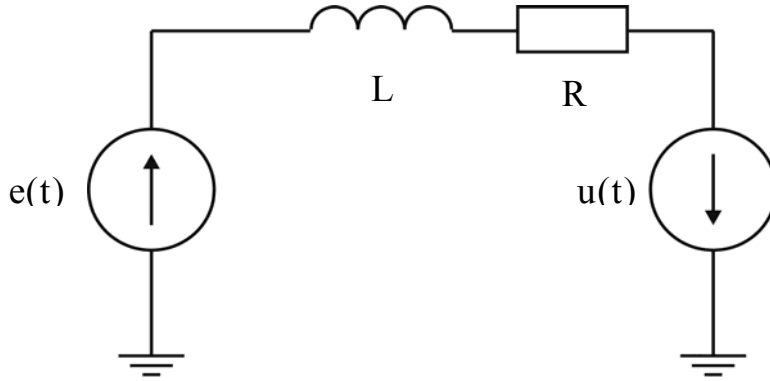


Рисунок 5 – Еквівалентна електрична схема фази ЦЛМ

Індукцію магнітної квазі-Халбах збірки, яка змінюється у часі, в загальному вигляді можна записати як

$$B(t) = B_0 \cos\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3}\right), \quad (7)$$

де  $B_0$  – амплітуда магнітної індукції;  
 $\omega$  – частота зміни магнітної індукції;  
 $n$  – коефіцієнт зсуву фаз трифазної системи.  
 Вираз для  $e(t)$  буде мати вигляд

$$e(t) = E_m \sin\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3}\right), \quad (8)$$

при  $E_m = kSB_0\omega$ ,  
 де  $S$  – площа, яку перетинає магнітний потік;  
 $k$  – конструктивний коефіцієнт електричної машини.  
 Для струму в колі

$$i(t) = \frac{E_m}{Z} \sin\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3} - \varphi\right), \quad (9)$$

при  $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ ;  
 $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ .

Запишемо вираз сили Ампера для  $n$ -ї фази

$$f_n(t) = i(t)B(t)l \sin \alpha. \quad (10)$$

Склавши сили для всіх фаз ЦЛМ отримаємо вираз для загальної сили на штоці трифазної ЦЛМ

$$f(t) = F_0 \left( -\frac{3}{2} \right) \sin \varphi, \quad (11)$$

де  $F_0 = \frac{E_m}{Z} B_0 l \sin \alpha$ ,

$\alpha$  – кут між вектором індукції та контуром;

$l$  – довжина обмотки, яку перетинає вектор індукції.

Знак « $\rightarrow$ » означає, що сила направлена проти руху магнітної частини.

Спираючись на математичну модель, а також на задані геометричні розміри та обрані конструктивні параметри було спроектовано ЕМА на базі ЦЛМ. Для розрахунків магнітного поля було використано пакет моделювання магнітостатики FEMM, який використовує метод кінцевих елементів (рис. 6)

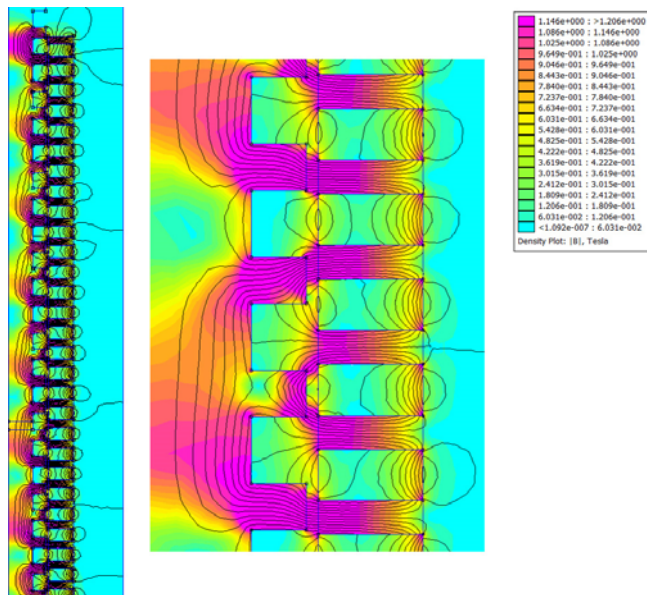
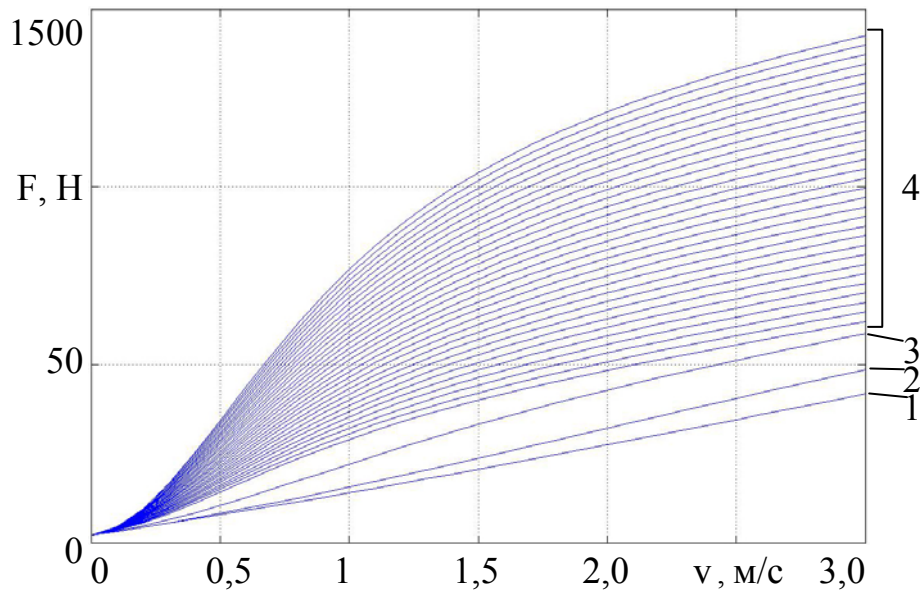


Рисунок 6 – Моделювання магнітного поля квазі-Халбах збірки ЕМА у програмі моделювання FEMM

На базі математичної моделі та конструктивних параметрів були побудовані робочі характеристики ЕМА для генераторного та двигунного режимів роботи (рис. 7).

Для експериментальних досліджень було створено опитний зразок ЕМА (рис. 8).



1 –  $R_{1н} = 240 \text{ Ом}$ ,  $k_{\text{EPC}} = 0$ ; 2 –  $R_{2н} = 120 \text{ Ом}$ ,  $k_{\text{EPC}} = 0$ ;

3 –  $R_{3н} = 30 \text{ Ом}$ ,  $k_{\text{EPC}} = 0$ ; 4 –  $R_{4н} = 0 \text{ Ом}$ ,  $k_{\text{EPC}} = 0 \dots 3$ .

Рисунок 7 – Робочі характеристики ЕМА для обох режимів роботи ЕМА в діапазоні  $v$  0...3 м/с

Обмоточна частина була виконана повністю, а магнітна частина складалась з елементарної магнітної секції. Як показали дослідження ЦЛМ, сила на штоці буде пропорційною кількості елементарних секцій, тому результати вимірювань можна збільшити пропорційно необхідній кількості елементарних секцій.



Рисунок 8 – Опитний зразок ЕМА

Через те, що використовується лише одна секція магнітної частини ЕМА, і сила на штоці буде значно меншою ніж у повнорозмірного зразка, чутливість випробувального стенду буде недостатньою. Виходячи з цього використали методику експерименту притаманну випробуванням циліндричних лінійних машин на постійних магнітах. Схема випробувальної установки приведена на рис. 9.

Для визначення основних параметрів та характеристик випробувальної установки розробимо математичну модель процесу руху магнітної частини ЕМА з обтяжувачами вздовж штоку з обмоткою.

Диференційне рівняння руху

$$m \frac{dv}{dt} + kv = mg - F, \quad (12)$$

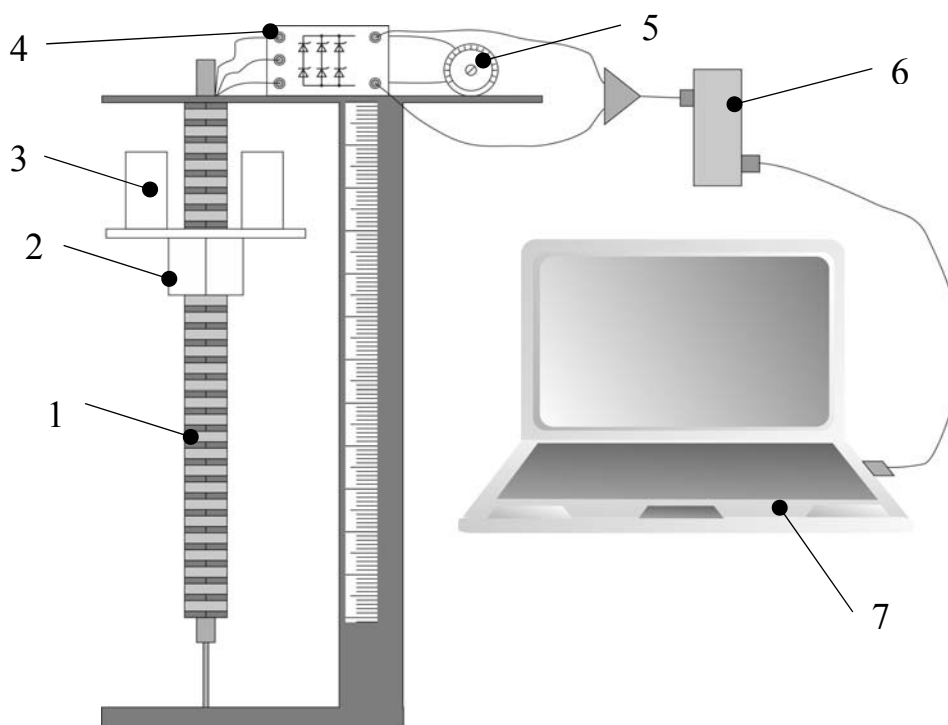
де  $m$  – маса магнітної частини ЕМА з обтяжувачами;

$k$  – коефіцієнт опору ЕМА;

$v$  – швидкість руху магнітної частини ЕМА;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$F$  – сила «сухого тертя».



1 – обмоточна частина; 2 – секція з магнітним масивом; 3 – обтяжувачи;

4 – шестипульсний випрямлювач; 5 – змінний резистор;

6 – цифровий осцилограф IRIS; 7 – персональний комп'ютер

Рисунок 9 – Схема випробувальної установки

Вирішення рівняння (12) запишемо дозволило отримати формулу для визначення поточного значення швидкості руху магнітної частини ЕМА відносно штоку з обмотками

$$v = \frac{m}{k} \left( g - \frac{F}{m} - \left( g - \frac{F}{m} - \frac{v_0 k}{m} \right) e^{-\frac{k}{m} t} \right) \quad (13)$$

З (13) видно, що процес зміни швидкості підкоряється експонентній залежності. При  $t \rightarrow \infty$  швидкість асимптотично наближається до значення  $\frac{1}{k}(mg - F)$ . Швидкість процесу визначається співвідношенням маси магнітної частини ЕМА та коефіцієнта опору ЕМА. Швидкість руху магнітної частини прямо пропорційна масі, зворотно пропорційна коефіцієнту опору ЕМА.

Для дослідження роботи ЕМА було вирішено провести випробування у декількох режимах роботи – коротке замикання обмоток, обрив обмоток та експериментальне навантаження. Коротке замикання імітувалося мінімальним навантаженням 4 Ом, при загальному опорі фазної обмотки 41 Ом. Експериментальне навантаження імітувалося вмиканням опорів 30 Ом та 120 Ом. Розрив обмоток імітувався вмиканням опору 240 Ом.

Для імітування зміни взаємної швидкості підресореної та непідресореної мас у діапазоні від 1 до 3,0 м/с використовувались грузи масою  $m_n$  від 4 кг до 6 кг.

Оскільки ЕРС, яка наводиться у обмотках, прямо пропорційна, за законом електромагнітної індукції, швидкості руху магнітної частини ЕМА вздовж активної зони, то часові характеристики падіння напруги на навантаженні будемо вважати такими, що характеризують швидкість руху магнітної частини.

Згідно з теоретичним обґрунтуванням експерименту, швидкість руху магнітної системи з обтяжувачем вздовж активної частини ЕМА з часом буде наближуватися до сталої швидкості руху

$$v_{\text{стале}} = \frac{1}{k}(mg - F). \quad (14)$$

Це значення швидкості будемо використовувати для побудови робочої характеристики ЕМА. Приклад графіка отриманого експериментального сигналу наведено на рис. 10.

Після визначення моменту встановлення постійної швидкості руху магнітної частини з обтяжувачем визначається фізичне положення магнітної секції ЕМА, з моменту встановлення постійної швидкості, відносно початку руху у активній зоні ЕМА. Таким чином визначається швидкість руху магнітної секції та отримується можливість побудови робочої характеристики ЕМА.

Будемо вважати, що вага магнітної частини з обтяжувачем є сила  $F_n$  на штоці, а швидкість взаємного переміщення магнітної частини та штоку з обмотками – шукане значення швидкості  $v$ , м/с. Отримані значення сили на штоці та швидкості при різних значеннях опору навантаження наведено в табл. 1.  $R_{1n} = 4$  Ом – імітує режим короткого замкнення фазних обмоток.

Опір не дорівнює нулю для коректного виміру напруги у фазній обмотці в режимі короткого замкнення. Він значно менший за власний опір фазної обмотки тому його можна вважати еквівалентним відсутності навантаження. Величина сили «сухого тертя»  $F$  була визначена експериментально і вона дорівнює 20 Н.

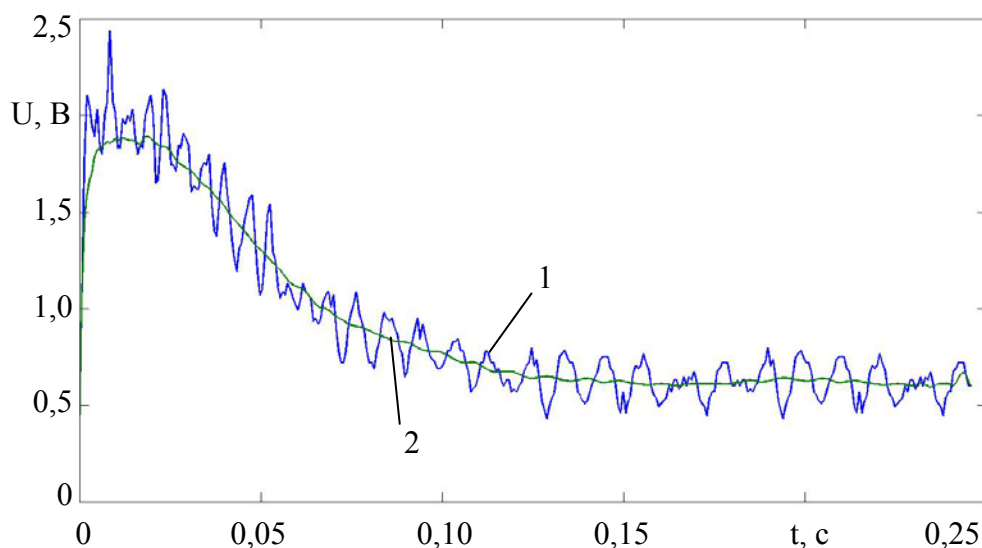


Рисунок 10 – Вимірний (1) та згладжений (2) сигнал для  $R_H=4$  Ом та  $m_H=4,6$  кг

Таблиця 1 – Значення швидкості руху  $v$ , м/с в залежності від  $R_H$  та  $F_H$

	$F_H = 40$ Н	$F_H = 45$ Н	$F_H = 49$ Н	$F_H = 59$ Н
$R_{1H} = 4$ Ом	1,05	1,12	1,22	1,61
$R_{2H} = 30$ Ом	1,25	1,41	1,54	1,87
$R_{3H} = 120$ Ом	1,71	1,97	2,21	2,49
$R_{4H} = 240$ Ом	2,0	2,23	2,56	2,86

Отриманні розрахункові дані збільшимо у сім разів, для відтворення сили на штоці ЦЛМ з сьома елементарними магнітними секціями. Наложимо на робочі характеристики отримані при моделюванні роботи ЕМА (рис. 11).

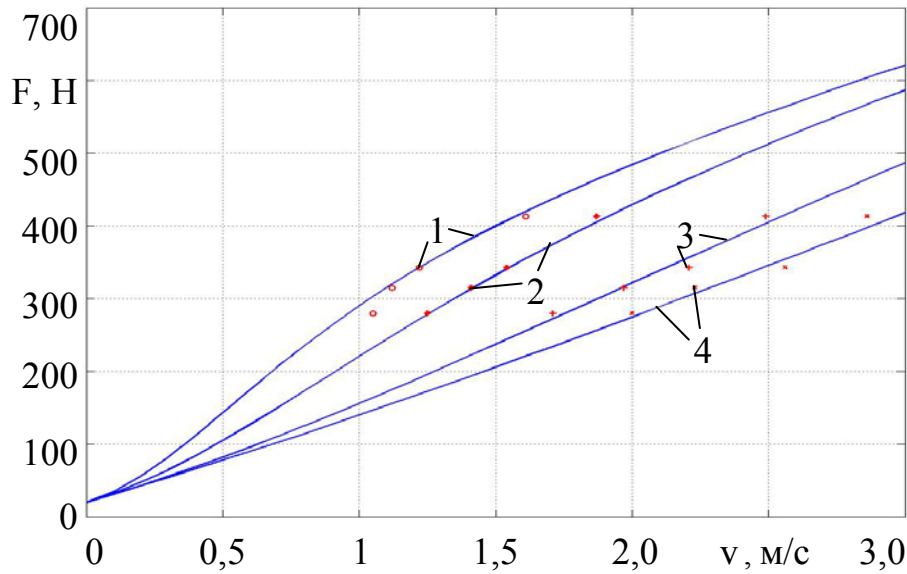
Розбіжність експериментальних та теоретичних результатів склала 6%.

За допомогою обчислювального середовища Матлаб, робочі характеристики ЕМА були апроксимовані поліномами другого порядку методом найменших квадратів. Отримані функції з допомогою Матлаб продиференціювали для отримання залежностей відносного коефіцієнту затухання коливань ЕМА від взаємної швидкості підресореної та непідресореної мас автомобіля (рис. 12).

Отримані залежності дозволили зробити висновки про розподіл режимів роботи ЕМА – рекуперативного та двигунного.

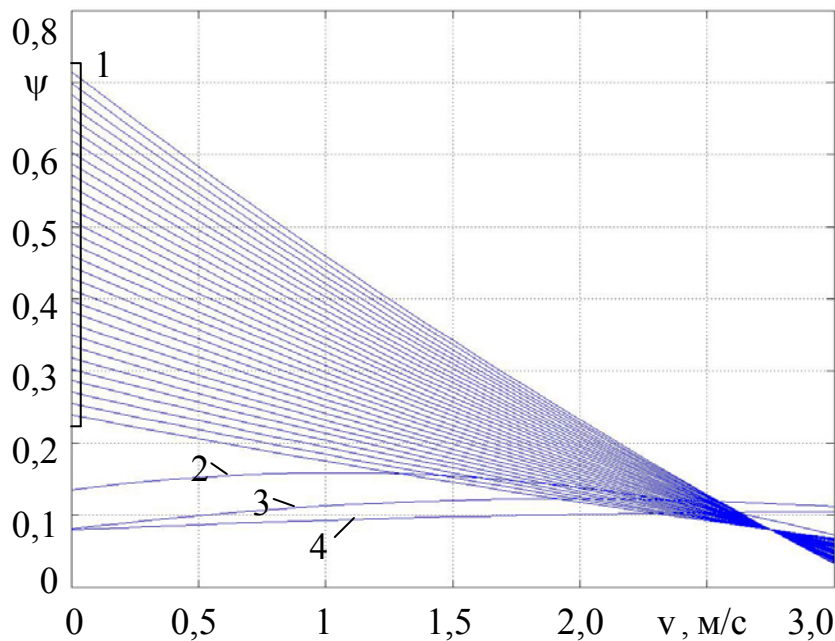
**Четвертий розділ** присвячений побудові архітектури системи керування підвіскою, створенню алгоритму її роботи та імітаційному моделюванню роботи системи в режимах, які спрямовані на підвищення енергоефективності автомобіля.

Система складається з датчиків, ПІС-контролера для виконання дискретного перетворення Фур'є, керуючого мікропроцесора та блоку керування з виконавчим пристроєм.



1 –  $R_{1H} = 4 \text{ Ом}$ ; 2 –  $R_{2H} = 30 \text{ Ом}$ ; 3 –  $R_{3H} = 120 \text{ Ом}$ ; 4 –  $R_{4H} = 240 \text{ Ом}$ .

Рисунок 11 – Робочі характеристики ЕМА для генераторного режиму роботи в діапазоні  $v \ 0 \dots 3 \text{ м/с}$ . Розрахункові та експериментальні дані



1 –  $R_{1H} = 0 \text{ Ом}$ ,  $k_{EPC} = 0 \dots 3$ ; 2 –  $R_{2H} = 30 \text{ Ом}$ ,  $k_{EPC} = 0$ ;

3 –  $R_{3H} = 120 \text{ Ом}$ ,  $k_{EPC} = 0$ ; 4 –  $R_{4H} = 240 \text{ Ом}$ ,  $k_{EPC} = 0$ .

Рисунок 12 – Залежність коефіцієнту затухання  $\psi$  від швидкості  $v$  для всіх режимів роботи ЕМА

Інформація про параметри руху автомобіля передається по інформаційним каналам до інформаційно-обчислювального блоку, обробляється, та на основі цих даних приймається рішення про зміну параметрів підвіски.

Для дослідження залежності плавності руху автомобіля від зміни відносного коефіцієнта згасання було проведено імітаційне моделювання для різних дорожніх умов. Плавність ходу характеризує середньоквадратичне значення прискорення центру мас автомобіля –  $\sigma_{\ddot{z}}$ .

Для моделювання збурюючого впливу було обрано стохастичну модель подання. Коефіцієнти передаточної функції визначені у відповідності до розробленої математичної моделі. Фазова затримка реалізована блоком часової затримки. Приклад Simulink-моделі руху по асфальтовій дорозі в поганому стані зі швидкістю 20 м/с та  $\psi = 0,1$  наведено на рис. 13. Реалізація випадкового збурюючого впливу, для цього випадку, наведено на рис. 14. Реалізацію миттєвих значень прискорень центру мас наведено на рис. 15.

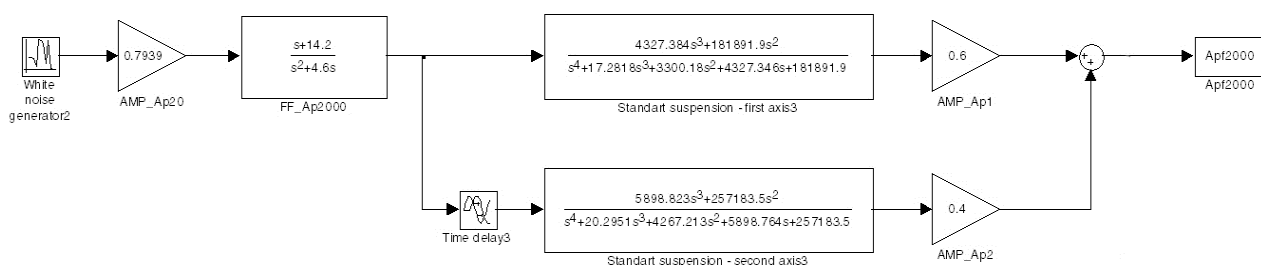


Рисунок 13 – Схема імітаційної моделі коливань автомобіля при русі по асфальту у поганому стані зі швидкістю 20 м/с

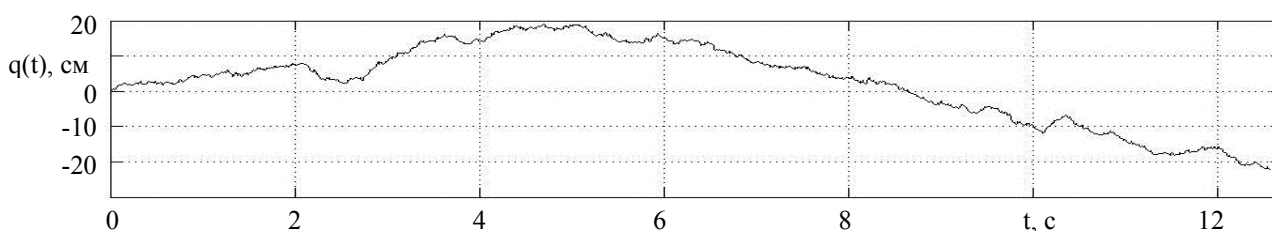


Рисунок 14 – Реалізація випадкового збурюючого впливу при русі по асфальту в поганому стані зі швидкістю 20 м/с

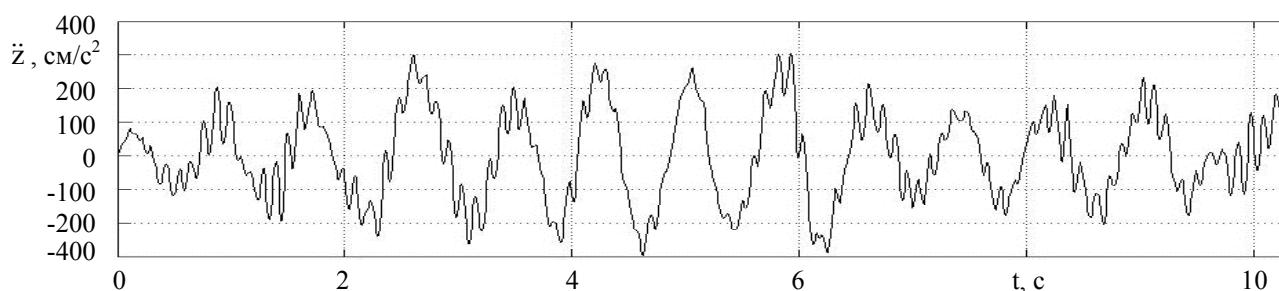
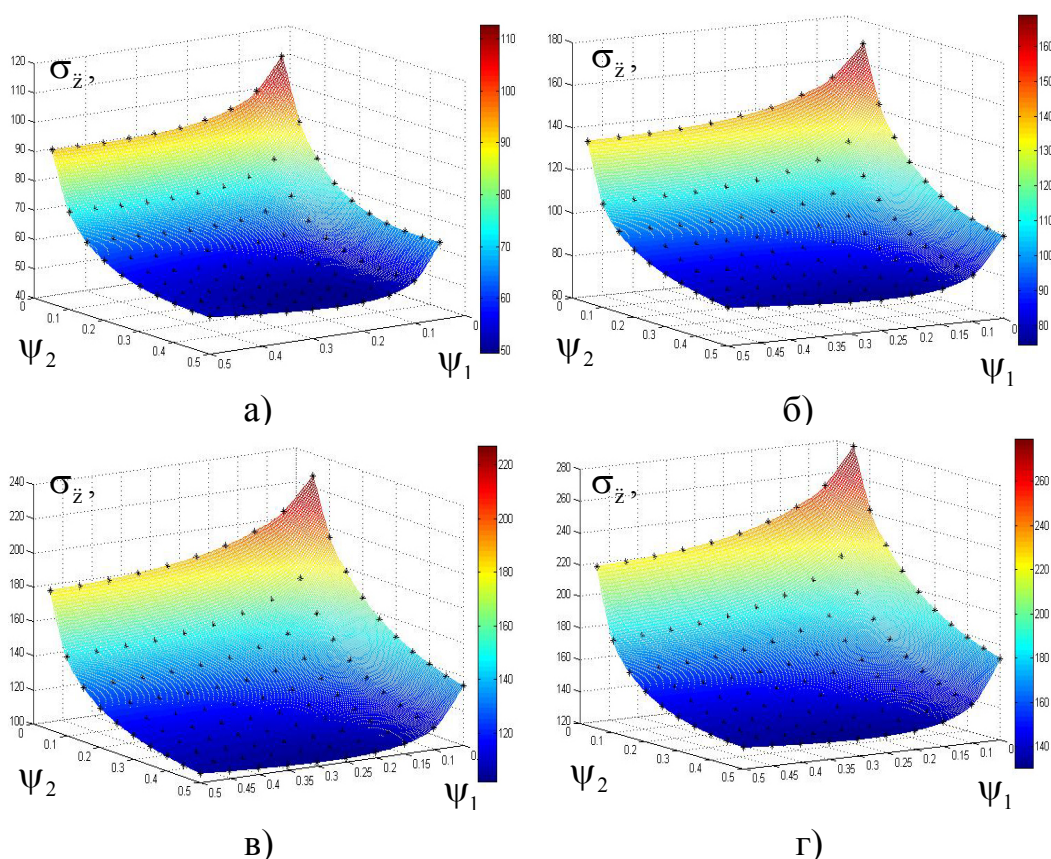


Рисунок 15 – Прискорення центру мас автомобіля при русі по асфальту у поганому стані зі швидкістю 20 м/с

Загалом було побудовано імітаційні моделі для трьох типів дорожньої поверхні – асфальту у гарному стані, асфальту у поганому стані та бруківки; чотирьох швидкостей руху – 10 м/с, 15 м/с, 20 м/с, 25 м/с; десяти значень

відносного коефіцієнту затухання коливань для першої ( $\psi_1$ ) та другої ( $\psi_2$ ) вісі – від 0,1 до 0,5 з кроком 0,05.

Для кожної з моделей було обраховано значення  $\sigma_{\ddot{z}}$ , та побудовані поверхні відгуку  $\sigma_{\ddot{z}}(\psi_1, \psi_2)$ . Аналіз поверхонь показав наявність значень  $\psi_1$  та  $\psi_2$  при яких  $\sigma_{\ddot{z}}$  буде мінімальним для даних умов руху. Приклад поверхонь для руху по асфальту у поганому стані зі швидкостями 10 м/с, 15 м/с, 20 м/с, 25 м/с наведено на рис. 16.



а – 10 м/с; б – 15 м/с; в – 20 м/с; г – 25 м/с

Рисунок 16 – Графік залежності прискорення коливань центру мас автомобіля від коефіцієнтів затухання коливань передньої та задньої вісі при русі по асфальту у поганому стані при різних швидкостях

Для дослідження режиму рекуперації було проведено імітаційне моделювання. Для цього було обрано рух з швидкостями 20 м/с та 25 м/с по асфальту у поганому стані та бруківці. Для забезпечення нормованої плавності руху, відносний коефіцієнт затухання коливань  $\psi = 0,15$ . Імітаційне моделювання виконувалось у Simulink. Приклад моделі наведено на рис. 17.

Результатом моделювання є масив значень миттєвої швидкості взаємних переміщень підресореної та непідресореної мас (рис 18).

Після обробки у Матлабі для кожного з режимів руху була визначена середньоквадратична швидкість взаємних переміщень підресореної та непідресореної мас автомобіля. Отримані середньоквадратичні значення швидкостей, за допомогою розробленої математичної моделі, були використані

для визначення потужності, яку виробляє ЕМА. Результати розрахунку наведено у табл. 2.

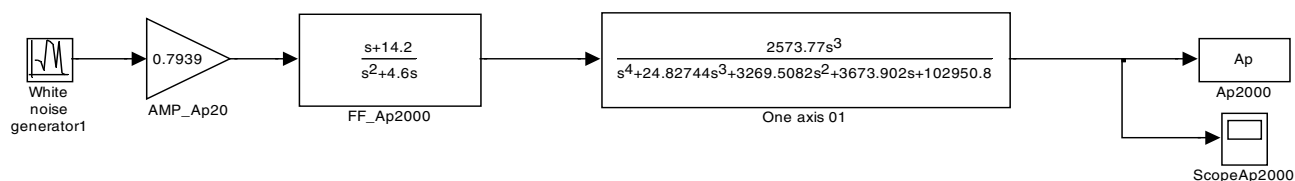


Рисунок 17 – Імітаційна модель коливань осі автомобіля при русі по асфальту в поганому стані зі швидкістю 20 м/с

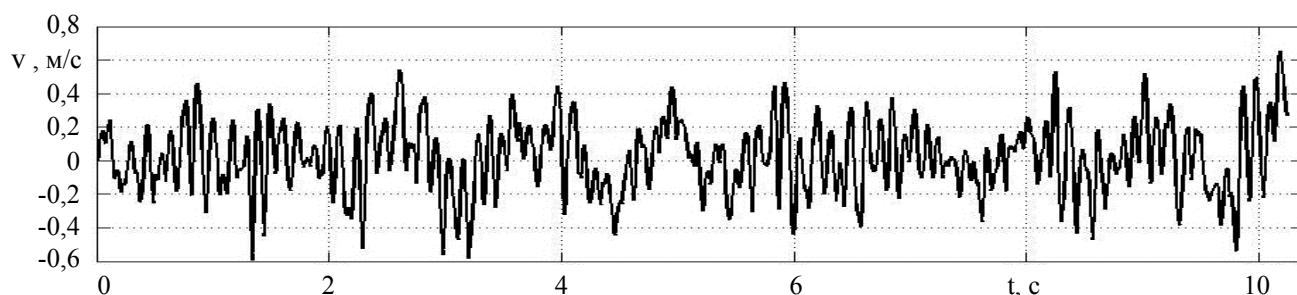


Рисунок 18 – Реалізація швидкості взаємних переміщень підресореної та невідресореної мас автомобіля при русі по дорозі з асфальтовим покриттям у поганому стані зі швидкістю 20 м/с

Таблиця 2 – Середньоквадратична швидкість взаємних переміщень підресореної й невідресореної маси та вироблена ЕМА потужність

	$v_{ск}, \text{ м/с}$		$P, \text{ Вт}$	
	$v_a = 20 \text{ м/с}$	$v_a = 25 \text{ м/с}$	$v_a = 20 \text{ м/с}$	$v_a = 25 \text{ м/с}$
Асфальт в поганому стані	0,2090	0,2452	11,9508	16,3808
Бруківка	0,7964	0,8528	155,0092	174,9675

## ВИСНОВКИ

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати дозволили істотно вдосконалити математичну модель й засоби автоматичного керування плавністю ходу автомобіля в різних дорожніх умовах. Застосування розвинутої моделі у системі автоматичного керування плавністю ходу дозволяє більш обґрунтовано розробляти архітектуру мікропроцесорних систем автоматичного демпфірування коливань, алгоритмів адаптивного керування та підвищувати енергоефективність автомобіля.

Узагальнення основних наукових і практичних результатів дозволило зробити наступні висновки:

1. Аналітичний огляд сучасних підвісок з точки зору плавності ходу та

енергоефективності дозволив зробити висновок про необхідність використання адаптивних керованих підвісок.

2. Розроблена модель вертикальних коливань, на відміну від існуючих, дозволяє врахувати вплив фазової затримки коливань задньої вісі відносно передньої на центр мас автомобіля. І, таким чином, вирішити задачу вибору відносного коефіцієнта затухання коливань для кожної вісі, тим самим забезпечивши зниження прискорень центра мас.

3. Розроблена математична модель виконавчого пристрою дозволила створити експериментальний зразок ЕМА з використанням комбінованої трьохфазної обмотки та квазіХалбах магнітного масиву. Експериментальні дослідження створеного зразка довели правильність математичної моделі та його здатність забезпечити обрані відносні коефіцієнти затухання коливань.

4. Запропонована архітектура системи керування адаптивною підвіскою, дозволила реалізувати алгоритм роботи системи, який забезпечує необхідну плавність ходу та рекуперативний режим роботи підвіски.

5. Імітаційне моделювання підтвердило правильність розробленої математичної моделі вертикальних коливань центру мас та показало можливість поліпшення плавності ходу шляхом зміни коефіцієнта опору ЕМА. Це виражається в зниженні величини с.к.в. вертикальних прискорень в діапазоні від 13 до 15%.

6. Імітаційне моделювання рекуперативного режиму роботи підвіски показало можливість рекуперації до 155 Вт з кожного амортизатора в залежності від дорожніх умов.

Теоретичні та експериментальні дослідження, проведені в роботі, довели можливість підвищення плавності ходу та енергоефективності автомобіля за рахунок використання електромагнітної підвіски.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Калмыков В. И. Анализ функциональных возможностей систем электроснабжения АТС / Калмыков В. И., Лукьянов А. В., Рожков С. П. // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – Харьков, Издательство ХГАДТУ, 2001. – Вып. 6. – С. 96 – 99.
2. Рожков П. П. Регулировочные характеристики пневматического амортизатора с магнитной жидкостью / Рожков П.П., Калмыков В. И., Бороденко Ю. Н., Рожков С.П. // Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета. – Харьков: Издательство ХГАДТУ, 2001. – Вып. 15-16. – С. 203 – 205.
3. Рожков П.П. Параметрична ідентифікація динамічної системи підвіски транспортної машини за допомогою рівняння Вінера-Хопфа / Рожков П.П., Фурман І.О., Рожков С.П. // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2002. – №10. – С. 391 – 397.
4. Рожков С. П. Аналіз потужності дисипативних сил у підвісці електромобіля. / Рожков С. П. // Вестник Харьковского национального

- автомобильно-дорожного университета. – Вып. 56. – Харьков: Издательство ХНАДУ, 2012 – с. 90-93.
5. Рожков С. П. Вибір типу підвіски електромобіля / Рожков С. П. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. – 2012. – №130. – С. 91 – 93.
  6. Рожков П. П. Комп'ютерний аналіз оптимального співвідношення динамічних параметрів підвіски автомобіля / Рожков П.П., Рожков С.П. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки. – 2013. – №142. – С. 56 – 57.
  7. Рожков С.П. Використання вдосконаленої моделі коливань автомобіля для побудови і аналізу АЧХ / Рожков С.П. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України – №15. - Харків: ХНТУСГ, 2014. – с. 62 – 63.
  8. Бажинов О. В. Вибір конструкції актуатора для використання у електромагнітній підвісці автомобіля / Бажинов О. В., Рожков С. П., Рожкова С. Е. // Вісник СевНТУ: збірник наукових праць. – 2013. – №142. – С. 142 – 144.
  9. S. Rozhkova. Methods experimental research working characteristics of the electromagnetic shock absorber / S. Rozhkova, S. Rozhkov // Vehicle and Electronics. Innovative Technologies Electronic scientific professional edition. – 2015. – №7. – P. 27 – 29.
  10. Rozhkov S.P. Review of maintypes of suspension systems and suspension choice for the electric car according to given criteria / Rozhkov S.P., Voronova Ye.M. // Міжнародна науково-практична конференція студентів і молодих учених вищих технічних навчальних закладів «Інноваційні процеси та технології. Шляхи їхньої реалізації в автомобільній, дорожньо-будівельній, транспортній, природоохоронній й освітній галузях»: збірник матеріалів, 11-12 квітня 2013 р., Харків / Склад. О.В. Первашова. – Харків: ФОП Попов, 2013. – С. 277 – 281.
  11. Рожкова С. Э. Анализ колебаний нелинейной подвески автомобиля / Рожкова С. Э., Рожков С. П. // Мехатроника транспортных средств и технологических машин: сборник докладов 2-ой международной интернет-конференции, 15 марта – 15 июня 2012 г., Губкин / Сост. О.П. Зюбан и др. – Губкин: ООО «Айкью», 2012. – С. 118 – 125.
  12. Рожков П. П. Моделювання розподілу магнітного поля циліндричної лінійної машини на постійних магнітах: програма та матеріали V міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Новітні технології в електроенергетиці» / Рожков С.П., Рожков С.П. // Міністерство освіти і науки України, Харківський національний університет міського господарства ім. А. Н. Бекетова. – Харків: ХНУМГ, 2015. – С. 101 – 103.

## АНОТАЦІЯ

**Рожков С. П.** Розробка системи керування адаптивною підвіскою автомобіля з урахуванням умов експлуатації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Ремонт та експлуатація засобів транспорту. – Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України, Харків, 2016.

Дисертація присвячена проблемі підвищення енергоефективності автомобіля за рахунок керування процесом коливань центру мас автомобіля. Введення до конструкції підвіски автомобіля керованого електромагнітного амортизатора (ЕМА) дозволяє підвищити експлуатаційні показники за рахунок збереження нормованих значень середньоквадратичного прискорення центру мас автомобіля при різних умовах руху та можливості рекуперації енергії коливань підвіски.

Розвинута математична модель коливань автомобіля дозволяє дослідити характеристики коливань центру мас у різних дорожніх умовах. Отримані аналітичні залежності використовуються для розрахунку параметрів підвіски для використання в системі керування.

Побудована математична модель ЕМА, що дозволило отримати його робочі характеристики при використанні в підвісці автомобіля. Отримані теоретичні результати були підтверджені експериментально.

Імітаційне моделювання руху автомобіля у різних дорожніх умовах дозволило дослідити вплив керування підвіскою на підвищення енергоефективності автомобіля.

*Ключові слова:* автомобіль, енергоефективність, двомасова модель, коливання центру мас, електромагнітний амортизатор, рекуперація.

## АННОТАЦИЯ

**Рожков С. П.** Разработка системы управления адаптивной подвеской автомобиля с учетом условий эксплуатации. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – Ремонт и эксплуатация средств транспорта. – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2016.

Диссертация посвящена проблеме повышения энергоэффективности автомобиля за счет управления процессом колебаний центра масс автомобиля. Введение в конструкцию подвески автомобиля управляемого электромагнитного амортизатора на базе электрической цилиндрической линейной машины позволяет повысить эксплуатационные показатели автомобиля за счет сохранения нормированных значений среднееквдратичного значения ускорений центра масс при различных условиях движения автомобиля и возможности рекуперации энергии колебаний подвески.

Усовершенствованная математическая модель колебаний автомобиля учитывает запаздывание колебаний задней оси относительно передней, что позволяет исследовать характеристики колебаний центра масс в различных дорожных условиях. Полученные аналитические зависимости использованы для построения имитационной модели колебаний автомобиля и расчета параметров подвески для использования в системе управления.

Основным критерием выбора типа конструкции ЭМА стало требование к плотности силы ЦМ. Построенная математическая модель ЭМА позволила определить его рабочие характеристики при использовании в подвеске автомобиля. Полученные теоретические результаты были подтверждены экспериментально.

На основе усовершенствованной математической модели колебаний подвески, была построена имитационная модель движения автомобиля в разных дорожных условиях. Моделирование позволило исследовать влияние изменения параметров подвески на повышение плавности хода и энергоэффективности автомобиля. Результаты имитационного моделирования подтвердили теоретически полученные зависимости ускорений колебаний центра масс автомобиля от параметров подвески для различных режимов эксплуатации. Также было получено подтверждение существования рекуперативного режима работы ЭМА и оценен уровень мощности, которую он вырабатывает.

*Ключевые слова:* автомобиль, энергоэффективность, двухмассовая модель, колебания центра масс, электромагнитный амортизатор, рекуперация.

## ABSTRACT

**S. Rozhkov.** Developing vehicle adaptive suspension control system taking into account operating conditions. – Manuscript copyright.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, speciality 05.22.20 – Repair and maintenance of vehicles. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2016.

The thesis is devoted to a problem of automobile energy efficiency increasing due to management center of mass fluctuations. Using of managed electromagnetic shock-absorber in an automobile suspension design, allows to increase operating characteristics such as center of mass accelerations mean square values in different traffic conditions and a possibility of suspension fluctuations energy regeneration.

Advanced mathematical model of car oscillations allows exploring the characteristics of the center of mass fluctuations in various road conditions. The analytical dependences are used for calculation of parameters of control system.

A mathematical model of EMA developed, which provided its performance when used in car suspension. The theoretical results were verified experimentally.

Simulation modeling of the vehicle in different road conditions allowed to investigate the effect of suspension control on the energy efficiency of the car.

*Keywords:* car, energy efficiency, dual-mass model, center of mass oscillations, electromagnetic shock absorber, regeneration.

Підписано до друку 05 травня 2016 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 0,9.  
Наклад 100 прим. Зам. № 33315

Віддруковано в ТОВ «ДРУКАРНЯ МАДРИД»  
61024, м. Харків, вул. Максимил'янівська, 11  
Тел.: (057) 756-53-25  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
Серія ДК, № 4399 от 27.08.2012 р.  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua) e-mail: [info@madrid.in.ua](mailto:info@madrid.in.ua)