

В.В. Дущенко, В.Г. Маслієв, Р.А. Нанівський, А.О. Маслієв

ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТОРЕОЛОГІЧНИХ ЕЛАСТОМЕРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СИСТЕМ ПІДРЕСОРЮВАННЯ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Метою роботи є дослідження впливу керування пружними та демпфуючими характеристиками системи підресорювання на основі використання магніторологічних еластомерів на плавність ходу колісних транспортних засобів. Методика. При дослідженнях використано методи: теорії магнітного поля, теорії підресорювання транспортних засобів, теорії планування експерименту, а також пакет Femt для дослідження характеристик магнітного поля та математичне моделювання руху колісних транспортних засобів по нерівностям у середовищі Delphi. Результати. Розроблено, досліджено та запатентовано конструкції пружних шарнірів важелів підвіски з магніторологічними еластомерами. Визначено відносні межі зміни модулів пружності та втрат даних шарнірів при здійсненні керування характеристиками підвіски для забезпечення підвищення плавності ходу колісного транспортного засобу. Наукова новизна. Вперше досліджено доцільність застосування магніторологічних еластомерів для керування пружними та демпфуючими характеристиками систем підресорювання колісних транспортних засобів та визначено закони керування, які дозволяють підвищити плавність ходу більше ніж на 40 %; встановлено, що керування модулем втрат в більшій мірі впливає на підвищення плавності ходу, ніж керування модулем пружності. Практична цінність. Розроблено конструкції та визначено відносні межі змін модулів пружності та втрат шарнірів із магніторологічних еластомерів при здійсненні їх керування, що дозволить формулювати вимоги до еластомерів при розробці перспективних конструкцій шарнірів для систем підресорювання транспортних засобів. Бібл. 21, рис. 17.

Ключові слова: магніторологічний еластомер, керуюче магнітне поле, модуль пружності, модуль втрат, колісний транспортний засіб, система підресорювання, пружні шарніри, керування характеристиками підвіски.

Целью работы является исследование влияния управления упругими и демпфирующими характеристиками системы поддресоривания на основе использования магнитореологических эластомеров на плавность хода колесных транспортных средств. Методика. При исследованиях использованы методы: теории магнитного поля, теории поддресоривания транспортных средств, теории планирования эксперимента, а также пакет Femt для исследования характеристик магнитного поля и математическое моделирование движения колесных транспортных средств по неровностям в среде Delphi. Результаты. Разработаны, исследованы и запатентованы конструкции упругих шарниров рычагов подвески с магнитореологическими эластомерами. Определены относительные границы изменения модулей упругости и потерь данных шарниров при осуществлении управления характеристиками подвески для обеспечения повышения плавности хода колесного транспортного средства. Научная новизна. Впервые исследованы целесообразность применения магнитореологических эластомеров для управления упругими и демпфирующими характеристиками систем поддресоривания колесных транспортных средств и определены требования к законам управления, которые позволяют повысить плавность хода более чем на 40 %; установлено, что управление модулем потерь в большей степени влияет на повышение плавности хода, чем управление модулем упругости. Практическая ценность. Разработана конструкция и определены относительные границы изменений модулей упругости и потерь шарниров с магнитореологическими эластомерами при осуществлении их управления, что позволит сформулировать требования к эластомерам при разработке перспективных конструкций шарниров для систем поддресоривания транспортных средств. Библ. 21, рис. 17.

Ключевые слова: магнитореологический эластомер, управляющее магнитное поле, модуль упругости, модуль потерь, колесное транспортное средство, система поддресоривания, упругие шарниры, управление характеристиками подвески.

Постановка проблеми. Одним з перспективних напрямків подальшого підвищення плавності ходу транспортних засобів (ТЗ) при русі по пересіченій місцевості з високими швидкостями є застосування керування характеристиками їх систем підресорювання (СП). Однак, відомі традиційні рішення керування вузлів СП характеризуються складністю, високою вартістю та ненадійністю, що суттєво стримує їх впровадження на серійних зразках ТЗ. Однією з головних причин цього є незмінність фізико-хімічних властивостей і характеристик традиційних матеріалів, що використовуються у вузлах СП в якості робочого тіла. Можливе вирішення даної проблеми полягає у застосуванні нових, альтернативних, так званих «інтелектуальних» матеріалів (*smart materials*), які можуть змінювати свої властивості під дією зовнішніх керуючих впливів. Зокрема, до них належать і магніторологічні еластомери (МРЕ), модулі пружності та втрат яких можуть змінюватися під впливом керуючого

магнітного поля. Розробка нових технічних рішень керування вузлів СП з метою підвищення плавності ходу ТЗ, спрощення їх конструкції, забезпечення необхідної швидкодії керування при помірному енергоспоживанні є актуальною науковою проблемою, на вирішення якої і направлено представлені наукові дослідження.

Аналіз наукових публікацій. У роботах [1-3] наведено технологію виготовлення МРЕ: до матриці (із звичайної, або силіконової гуми, поліуретану, тощо), додають певну кількість (до 40 % за об'ємом) наповнювача – феромагнітних частинок, наприклад, карбонільного заліза, із розміром від 5 до 40 мкм. Суміш полімеризують при температурі близько 150 °С. Якщо даний процес відбувається під дією магнітного поля, то отримують МРЕ із анізотропними властивостями. Без поля – отримують ізотропний МРЕ.

© В.В. Дущенко, В.Г. Маслієв, Р.А. Нанівський, А.О. Маслієв

У роботі [4] експериментально доведено, що при гармонічних деформаціях зразків із МРЕ з частотами 1...50 Гц, прикладення магнітного поля збільшує у рази їх демпфуючі властивості.

У роботі [5] досліджено вплив магнітного поля на зразки із МРЕ при частоті деформацій 10 Гц. Демпфуючі властивості збільшувалися в межах від 4 до 18 разів, в залежності від розміру і концентрації магнітних частинок та величини індукції накладеного магнітного поля. Насичення МРЕ відбувалося при 600...800 мТл.

У роботі [6] досліджено демпфер, що створений на основі МРЕ, та призначений для віброзахисту прецизійного обладнання. Доведено, що швидкодія демпфера, яка склала 0,5 с, залежить від часу перехідних процесів в МРЕ. Швидкодія може регулюватися шляхом зміни сили струму в котушці керування.

У роботі [7] проведено порівняльну оцінку різних типів демпферів для прецизійного обладнання, у тому числі і на основі МРЕ, та доведено його переваги. Ефективність демпфування зростає із збільшенням об'ємної концентрації у МРЕ магнітних часток.

У роботі [8] досліджено зразки із МРЕ, матрицю якого виконано з натурального каучуку, а наповнювачем обрано карбонільне залізо (11 % за об'ємом) із частками розміром 3,5 мкм. Матриця полімеризувалася під дією зовнішнього магнітного поля до 1 Тл, для отримання анізотропних властивостей МРЕ. Також досліджувався зразок з ізотропними властивостями. У зразків з більш анізотропними властивостями приріст модуля зсуву при накладенні керуючого магнітного поля (0...600 мТл), збільшувався швидше.

У роботі [9] виявлено збільшення модуля зсуву у зразках із МРЕ на основі натуральної гуми до 130 %, а на основі силіконової гуми набагато більше.

У роботі [10] досліджено зразки з МРЕ із вмістом карбонільного заліза до 40 % (за об'ємом) з розміром часток 1...10 мкм. Доведено, що при зростанні об'ємної концентрації часток наповнювача ефективність поглинання енергії коливаних демпфером зростає. Підтверджена можливість регулювання жорсткості демпфера із МРЕ за допомогою керуючого струму.

Аналіз наведених робіт показує, що діапазон змін модулів пружності і втрат МРЕ під дією магнітного поля надає перспективу їх застосування у системах керування характеристиками СП колісних ТЗ, але дослідження магнітних і механічних властивостей МРЕ знаходяться ще на початковій стадії:

- досліджено зразки в основному невеликих розмірів та їх малі деформації: оскільки для отримання необхідного ефекту необхідно реалізувати магнітне поле близько 1 Тл, то зразки із МРЕ виконувалися з розміром у напрямку дії вектора магнітної індукції не більше за 1 мм. Відповідно, дослідження характеристик відповідають зразкам з такими параметрами;

- недостатньо досліджено швидкодія процесів керування, та її залежить від співвідношення в'язкісних та пружних властивостей МРЕ;

- недостатньо досліджено співвідношення зростання модуля пружності та модуля втрат від дії магнітного поля.

Тому, **метою роботи** є дослідження впливу керування пружними та демпфуючими характеристиками СП на основі використання МРЕ на плавність ходу колісних ТЗ.

Задачі, які треба вирішити для досягнення мети:

- виготовити зразки з МРЕ з параметрами, які придатні для досліджень та використання у СП;

- розробити та створити стенд для досліджень впливу магнітного поля на пружні та демпфуючі характеристики зразків з МРЕ;

- розробити та створити на сучасному рівні вимірювальну апаратуру для досліджень;

- провести експериментальні дослідження в умовах стенду впливу магнітного поля на статичні та динамічні характеристики зразків з МРЕ, у тому числі на швидкодію керування та співвідношення модулів пружності і втрат при дії керуючого магнітного поля;

- розробити конструкцію вузла із керуючим пристроєм на основі МРЕ для шарніра важеля СП;

- шляхом комп'ютерного моделювання провести порівняльні дослідження плавності ходу серійного колісного ТЗ з таким, що обладнано системою керування на основі використання МРЕ у СП;

- розробити рекомендації щодо використання МРЕ для керування пружними та демпфуючими характеристиками СП колісних ТЗ.

Методика проведення досліджень. В загальному випадку СП колісних ТЗ має у своєму складі пружні елементи, демпфуючі пристрої (амортизатори) та направляючі пристрої у вигляді важелів, які поєднують колеса через пружні гумові шарніри із корпусом ТЗ. Жорсткість та демпфуючі властивості даних шарнірів впливають на характеристики підвіски, а отже, і на плавність ходу ТЗ.

Таким чином, шляхом заміни у шарнірах гуми на МРЕ, можна реалізувати керування пружними і демпфуючими характеристиками підвіски у цілому.

Схему двохвальної підвіски колісного ТЗ наведено на рис. 1, де пружні шарніри 4 важелів виконано із МРЕ. З метою керування їх пружними та демпфуючими властивостями, на торцях шарнірів розміщено електромагніти, які створюють керуюче магнітне поле.

Для обчислення магнітної індукції, дослідження рівномірності розподілу магнітного поля у втулках із МРЕ шарнірів 4, та вибору їх раціональної конструкції, було застосовано програмний пакет Femm. Кінцево-елементна сітка створювалася у автоматичному режимі з можливістю її корегування для уточнення результатів досліджень.

Вихідними даними для досліджень були креслення пружної втулки, фізичні характеристики матеріалів складових магнітного ланцюга та магніторушійна сила, що створювалася струмом, який живить котушку. Криві намагнічування для обраних комерційно доступних марок сталей і МРЕ наведено на рис. 2, 3 відповідно до [11, 12].

З метою запобігання перегріву було встановлено обмеження на величину щільності струму у дроті котушки $< 10 \text{ А/мм}^2$, при терміні дії $< 10 \text{ с}$.

Було розглянуто та досліджено декілька варіантів конструкцій пружного шарніра із МРЕ, [10, 13-15]. Найбільш раціональним з точки зору технології виготовлення, можливості розміщення та ремонтпридатності було обрано варіант [15], який показаний на рис. 4.

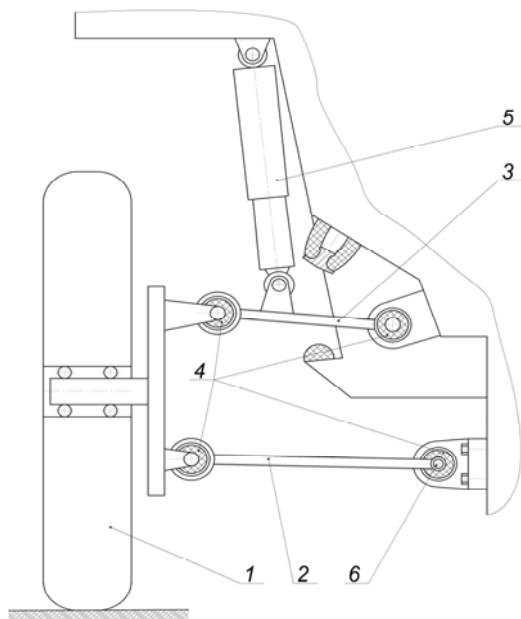


Рис. 1. Схема двохважільної підвіски ТЗ: 1 – колесо; 2 – нижній важіль; 3 – верхній важіль; 4 – пружні шарніри із МРЕ з електромагнітами керування; 5 – демпфіруючий пристрій (гідроамортизатор); 6 – пружний елемент (торсіон)

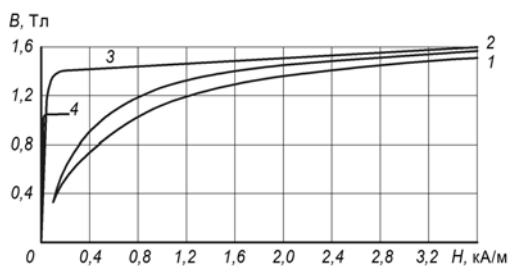


Рис. 2. Криві намагнічування: 1 – лита сталь; 2 – електротехнічна сталь E11; 3 – листовая сталь; 4 – пермалой

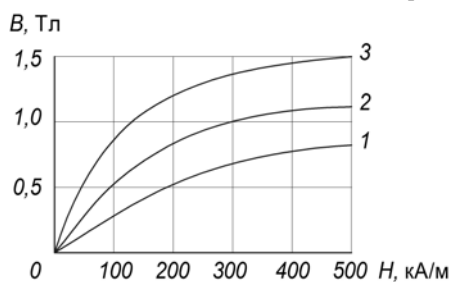


Рис. 3. Криві намагнічування: 1 – МРЕ із вмістом за об'ємом 20 % карбонільного заліза; 2 – МРЕ із вмістом карбонільного заліза 40 % за об'ємом; 3 – чистий порошок карбонільного заліза

Результати дослідження з використанням програмного пакету Femm, довели, що для забезпечення найбільше рівномірного розподілу магнітної індукції у торцевому 4 та радіальному 6 пружних елементах, що виготовлені із МРЕ, (рис. 4), одну з поверхонь у кожного з них треба виконати у вигляді конуса.

Варіювання величиною кутів нахилу утворюючих конусів до осі торсіону 7, дозволило отримати їх

раціональні значення, при яких магнітна індукція у торцевому 1 та радіальному 2 пружних елементах із МРЕ розподілялася достатньо рівномірно, а відхилення від середнього значення в межах 10 %, (рис. 5).

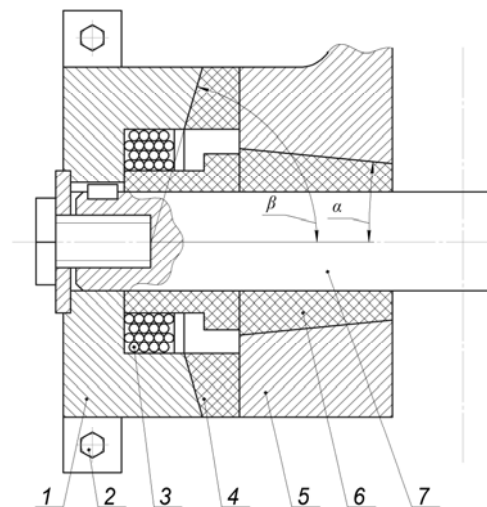


Рис. 4. Конструкція шарніра з МРЕ: 1 – кронштейн; 2 – болти кріплення до корпусу машини; 3 – котушка; 4 – торцевий пружний елемент із МРЕ; 5 – важіль підвіски; 6 – радіальний пружний елемент із МРЕ; 7 – торсіон

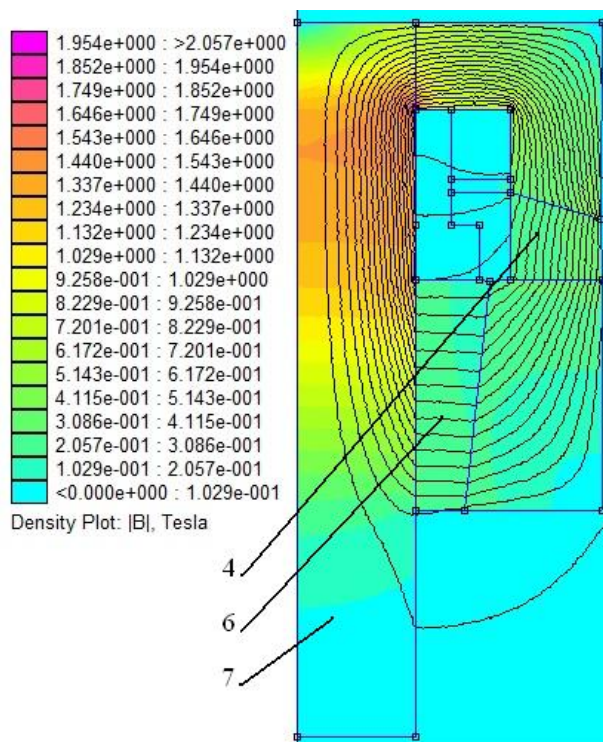


Рис. 5. Результати досліджень розподілу магнітного поля: 4 – торцевий пружний елемент із МРЕ; 6 – радіальний пружний елемент із МРЕ; 7 – торсіон (нумерація позицій – згідно до рис. 4)

За прийнятними габаритними параметрами шарніра та його котушки 3 (рис. 4), величина припустимої (за нагріванням) магніторушійної сили склала $F = 1500$ А. Це дозволило отримати магнітну індукцію у пружних елементах 4 і 6 в межах $B = 0,5 \dots 0,6$ Тл, (рис. 5). Згідно до [18], модуль пружності та коефіцієнт жорсткості мали збільшитися на 25 %, а коефіцієнт демпфування – на 18 %, що недостатньо для досягнення по-

ставленої мети досліджень. Тим не менш, у інших джерелах стверджується, що це підвищення може бути суттєво більшим [4, 9]. Причина даної суперечливості полягає в тому, що відносна магнітна проникність МРЕ невелика: при 40 % карбонільного заліза за об'ємом і $B = 0 \dots 0,5$ Тл, $\mu_r \approx 10$, а в при $B = 0,5 \dots 1$ Тл вона ще зменшується до $\mu_r \approx 4$ (рис. 3).

У свою чергу, в роботі [19] рекомендовано підвищувати магнітну проникність для практичного використання МРЕ. Таким чином, дана суперечливість потребує ретельної експериментальної перевірки, яку і було проведено на спеціально розробленому стенді, що показаний на рис. 6 [16, 17].



1 2 9 8 7 6 5 3 4 10

а



7 8 6 5 4 3

б

Рис. 6. Стенд для досліджень механічних характеристик зразків із МРЕ (а) та вузол, де встановлено зразки з МРЕ (б): 1 – амперметр; 2 – тензопідсилювач з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП); 3 – котушки для збудження магнітного потоку; 4 – осереддя котушок; 5 – пружні зразки із МРЕ, що досліджуються; 6 – прогиномір з тензорезисторами; 7 – магнітопровід; 8 – жорстка лінійка; 9 – гнучка пластина із немагнітного матеріалу; 10 – годинниковий індикатор

Даний стенд дозволяє проводити широкий спектр досліджень впливу магнітного поля на модулі пружності, зсуву та втрат зразків з МРЕ. При цьому практично виключено вплив таких сторонніх факторів, як гравітаційна сила тяжіння та сили тяжіння електромагнітів, а замкнений магнітний ланцюг із феромагнетиків буде збільшувати потік магнітної індукції, (рис. 7). Для до-

сліджень було використано метод електротензометрії, вимірювальні прилади створювалися на базі сучасних мікропроцесорних технологій (рис 8).

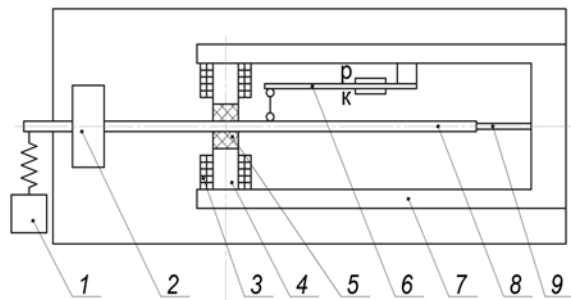
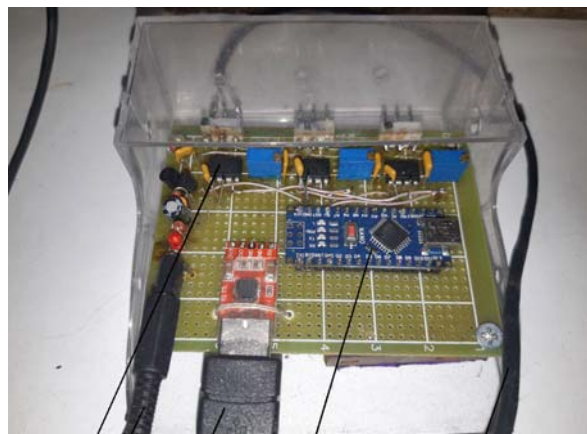


Рис. 7. Схема стенду для досліджень зразків із МРЕ: 1 – механічний ексцентриковий вібратор (частотний діапазон 0 ... 20 Гц; амплітуда коливань 1 мм); 2 – маса, що коливається; 3 – котушки для збудження магнітного потоку; 4 – осереддя котушок; 5 – пружні зразки із МРЕ, що досліджуються; 6 – прогиномір з тензорезисторами (р – робочий, к – компенсаційний); 7 – магнітопровід; 8 – жорстка лінійка; 9 – гнучка пластина із немагнітного матеріалу



1

2

3

4

5

Рис. 8. Вимірювальний пристрій: 1 – аналогові підсилювачі струму від тензорезисторів; 2 – обчислювач; 3 – екранований кабель; 4 – USB роз'єм виходу цифрованого сигналу до комп'ютера; 5 – кабель живлення

Частотний діапазон вимірювального пристрою, в межах якого коефіцієнт підсилення мав відхилення у межах $\pm 1,5$ %, складав 0...20 Гц. Схему вимірювального каналу наведено на рис. 9.

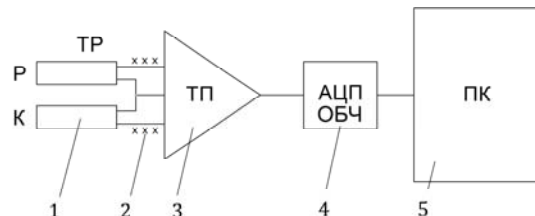


Рис. 9. Схема вимірювального каналу: 1 – TP – тензорезистори прогиноміру (р – робочий, к – компенсаційний); 2 – екранований кабель; 3 – аналоговий тензопідсилювач AD 625; 4 – обчислювач ATMEGA 328 з АЦП; 5 – персональний комп'ютер

Досліджувалися зразки 5 (рис. 7) у формі кілець із зовнішнім діаметром 20 мм, товщиною 10 мм та центральним отвором з діаметром 6 мм, які виготовлялися із МРЕ по відомій технології [6].

В якості матриці МРЕ використовувалася силіконова гума. Вміст карбонільного заліза за об'ємом обрано 40 %, розмір магнітних частинок 5...10 мкм.

Для створення анізотропної структури МРЕ полімеризація матеріалу зразків проводилася у термошафі при 160 °С упродовж 2 годин та при наявності магнітного поля $B = 0,6$ Тл, вектор якого спрямовувався до поверхонь зразків у тому ж напрямку, у якому буде спрямовано вектор магнітної індукції керуючого магнітного поля дослідження (зادля отримання його більшого впливу на характеристики [6]).

Перед початком вимірювань та після їх завершення проводилася пряма калібровка вимірювального каналу шляхом зміщення жорсткої лінійки 8 у один та другий бік за допомогою пружного динамометра, що викликало деформування зразків 5, які вимірювалися годинниковим індикатором 10 (рис. 6). Було отримано масштабний коефіцієнт $K = 0,067$.

Аналіз статичних характеристик показав, що індукція керуючого магнітного поля $B = 0,6$ Тл викликала зростання коефіцієнту жорсткості у 1,75, а коефіцієнта демпфірування – у 4,4 рази (коефіцієнт жорсткості обчислено при найбільших значеннях F та x , а коефіцієнт демпфірування – за площинками петель гістерезису). Отже, демпфірування у зразках зростало майже вчетверо швидше, ніж їх жорсткість (рис. 10).

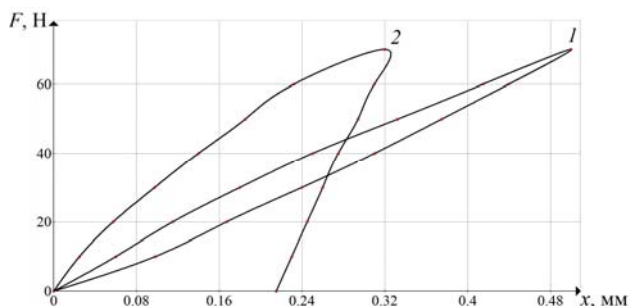


Рис. 10. Статичні характеристики навантаження зразків із МРЕ: 1 – без магнітного поля; 2 – магнітне поле $B = 0,6$ Тл

Таким чином, отримані результати відрізняються від наведених у [18], але не суперечать відомим дослідженням, а уточнюють їх. Це підтверджує, що технологію виготовлення МРЕ та напрямок досліджень нами обрано правильними.

При проведенні динамічних випробувань коливання збуджувалися механічним вібратором 1, який через пружину передавав гармонічну силу до жорсткої лінійки 8 і розгойдував її разом із масою 2 до отримання резонансних амплітуд.

На рис. 11, 12 наведено осцилограми власних коливань маси 2 на пружних зразках 5 із МРЕ.

Аналіз осцилограм показав, що при включенні керуючого магнітного поля стала часу зменшувалася з 1,48 с до 0,78 с, тобто швидкість затухання коливань поліпшувалася. Перехідний процес практично завершувався через $3 \cdot 0,78 = 2,34$ с.

При цьому, спостерігалася зростання коефіцієнту жорсткості зразків близько на 25 %, що викликало зростання частоти власних коливань з 2,5 до 2,7 Гц, тобто на 8 %. Коефіцієнт демпфірування збільшився на 118 % (з 0,038 до 0,083), тобто в 4,7 рази більше за

коефіцієнт жорсткості. Це наближено до результатів статичних випробувань, та відомими дослідженнями [4, 18].

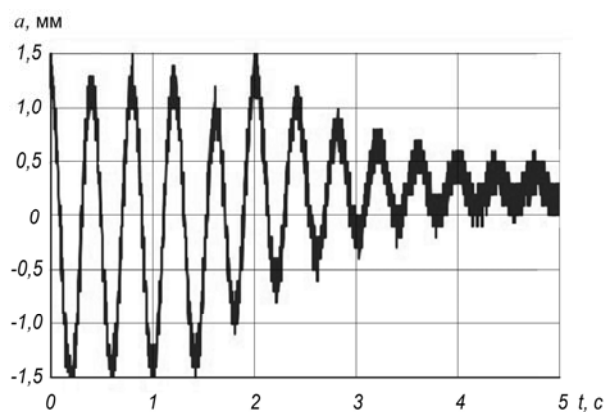


Рис. 11. Осцилограма коливань маси 2 на зразках 6 за відсутності керуючого магнітного поля

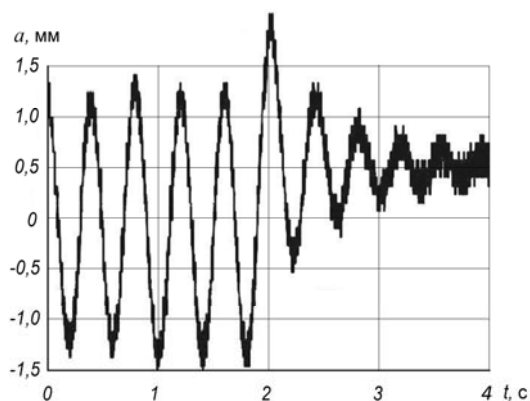


Рис. 12. Осцилограма коливань маси 2 на зразках 6 за наявності керуючого магнітного поля $B = 0,6$ Тл

На рис. 13 наведено зразок осцилограми вимушених (близьких до резонансних) коливань маси 2.

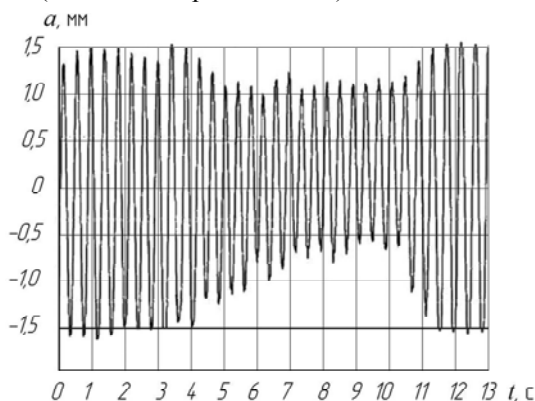


Рис. 13. Осцилограма вимушених коливань маси 2 на пружних зразках 5 із МРЕ при режимах «відсутності – включенні – відсутності» керуючого магнітного поля

За допомогою вібратора 1 система вводилася у режим резонансних коливань, а потім до котушок 3 (рис. 7) подавався струм, який створював керуюче магнітне поле з індукцією $B = 0,6$ Тл. При цьому амплітуди коливань зменшувалися вдвічі завдяки збільшенню демпфірування у пружних зразках 5 із МРЕ.

Після відключення магнітного поля система поверталася до режиму резонансних коливань, а їх амплітуди знову зростали.

літуди зростали вдвічі, тобто до початкової величини. Тривалість перехідних процесів склала близько 2,3 с.

Для подальшого зменшення амплітуд коливань необхідно збільшувати магнітну індукцію керуючого поля. Щоб запобігти зростанню втрат на нагрівання, це доцільно здійснювати не за рахунок підвищення струму в котушках, а шляхом створення МРЕ з підвищеною магнітною проникністю.

За результатами проведених досліджень шарнірів з МРЕ отримано 4 патенти України [14, 15, 17, 20].

Для теоретичного обґрунтування рекомендацій щодо практичного застосування отриманих результатів, було проведено порівняльні дослідження плавності ходу двох колісних ТЗ: серійного і такого ж, але обладнаного системою керування характеристиками СП на основі використання шарнірів з МРЕ у важелях підвіски (рис. 1 та рис. 4).

Плавність ходу даних ТЗ досліджувалася методом комп'ютерного моделювання їх руху по синусоїдальним дорожнім профілям нерівностей, відповідно до прийнятої у галузі методики, шляхом розрахунку і побудови швидкісних характеристик СП [21]. Дані характеристики являють собою залежності висоти нерівностей h (прохідна висота), яку ТЗ здатен подолати з вертикальними пришвидшеннями у місцях розташування людей не більшими за $3g$, ($29,43 \text{ м/с}^2$), що обумовлено ергономічними вимогами, від швидкості руху. Швидкісні характеристики розраховуються для трьох довжин нерівностей: $1,5L$, $2L$, та $2,5L$, де L – база машини.

Швидкісним характеристикам притаманні зони резонансів, коли частоти власних коливань підресованого корпусу ТЗ співпадають з частотою збурень від нерівностей. Прохідна висота нерівностей, що відповідає резонансу, має найменше значення, і зветься мінімальною прохідною висотою нерівностей. Відповідно до сучасних вимог щодо плавності ходу ТЗ високої прохідності, рівень мінімальних прохідних висот нерівностей повинен складати не менше ніж $0,19...0,24 \text{ м}$, в залежності від заданої середньої швидкості руху на місцевості.

Для запобігання перегріву електромагнітів, керування характеристиками СП буде застосовуватися лише при подоланні ділянок місцевості з важкими дорожніми умовами, що зазвичай мають протяжність $30...50 \text{ м}$, і на подолання яких буде витрачатися час не більше 10 с , при збереженні швидкості руху.

Для проведення досліджень було використано експериментально перевірену математичну модель руху колісного ТЗ [21], яку було доопрацьовано відповідно до застосування системи керування, та реалізовано у середовищі Delphi.

Проведемо оцінку впливу характеристик пружних шарнірів СП серійного ТЗ на плавність ходу.

З рис. 14 випливає наступне. У випадку, коли модуль втрат шарнірів дорівнює нулю, криві 2, спостерігається зниження мінімальних прохідних висот нерівностей на усіх резонансних швидкостях руху, які приблизно дорівнюють $6,6 \text{ м/с}$, $8,9 \text{ м/с}$ та 11 м/с , відповідно для нерівностей довжиною $1,5L$, $2L$ та $2,5L$.

Дане зниження відбувається з рівня $0,12...0,14 \text{ м}$ до рівня $0,09 \text{ м}$, тобто плавність ходу погіршується на $25...36 \%$.

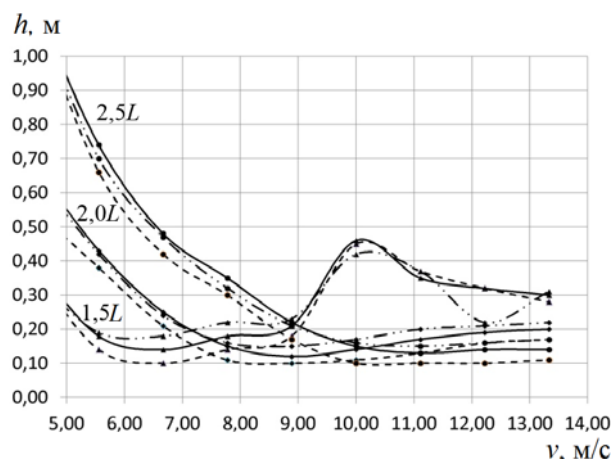


Рис. 14. Швидкісні характеристики СП: оцінка впливу пружних гумових шарнірів підвіски:

- 1 – шарніри з вихідними характеристиками;
- - - 2 – модуль втрат шарнірів дорівнює нулю;
- · - · 3 – модуль пружності шарнірів дорівнює нулю

Погіршення відбувається і на дорезонансних швидкостях для усіх довжин нерівностей. На зарезонансних швидкостях плавність руху погіршується на нерівностях довжиною $2L$ і $2,5L$ і залишається незмінною на нерівностях довжиною $1,5L$.

У свою чергу, варіант «модуль пружності шарнірів дорівнює нулю», криві 3, призводить до підвищення мінімальних прохідних висот нерівностей на резонансних швидкостях руху з рівня $0,12...0,14 \text{ м}$ до рівня $0,14...0,17 \text{ м}$, тобто плавність ходу покращується на $17...21 \%$. При цьому, на дорезонансних швидкостях плавність ходу незначно погіршується, а на резонансних – покращується, на нерівностях довжиною $2L$ і $2,5L$, та погіршується на $1,5L$.

Таким чином, характеристики пружних шарнірів важелів СП ТЗ вагомо впливають на його плавність ходу, і застосувавши керування їх модулями втрат та пружності на основі використання МРЕ, можна суттєво підвищити якість підресорювання.

З метою скорочення кількості керуючих електромагнітів та спрощення конструкції підвіски, у подальших дослідженнях було розглянуто застосування керування характеристиками шарнірів з МРЕ лише нижніх важелів підвіски, які сполучено із торсіонами.

На рис. 15 наведено результати дослідження впливу керування модулем пружності даних шарнірів із МРЕ. З графіків випливає, що при варіанті «модуль пружності дорівнює нулю», криві 2, на резонансних швидкостях руху мінімальні прохідні висоти нерівностей збільшуються з рівня $0,12...0,14 \text{ м}$ до рівня $0,13...0,15 \text{ м}$. При цьому плавність ходу на дорезонансних швидкостях практично не змінюється для усіх довжин нерівностей, а на зарезонансних швидкостях плавність ходу незначно покращується на нерівностях довжиною $2L$ і $2,5L$ та погіршується на $1,5L$.

У разі збільшення модуля пружності даних шарнірів у 5 разів (криві 3) мінімальні прохідні висоти нерівностей на резонансних швидкостях руху змен-

шуються з рівня 0,12...0,14 м до рівня 0,09 м. При цьому плавність ходу на дорезонансних швидкостях збільшується для усіх довжин нерівностей, а на зарезонансних швидкостях погіршується на усіх нерівностях, а особливо довжиною 1,5L. При збільшенні модуля пружності у 10 разів (криві 4) плавність ходу погіршується практично на усіх швидкостях руху і довжинах нерівностей.

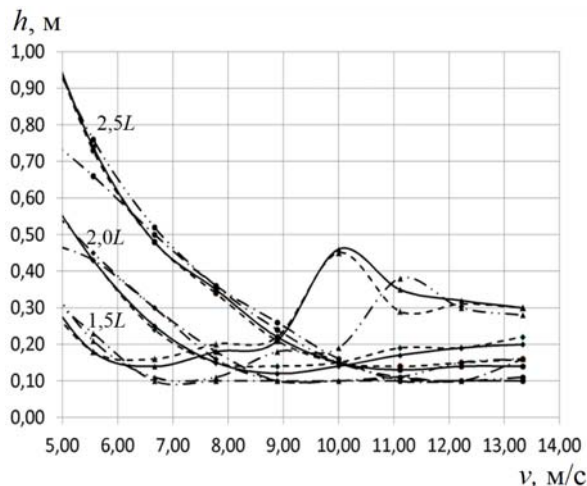


Рис. 15. Швидкісні характеристики СП: оцінка впливу керування модулем пружності шарнірів із МРЕ, (модуль втрат має вихідне значення):
 — 1 – вихідне значення модуля;
 - - - 2 – модуль дорівнює нулю;
 - · - · 3 – модуль збільшено у 5 разів;
 - - - - 4 – модуль збільшено у 10 разів

На рис. 16 наведено результати дослідження впливу керування модулем втрат шарнірів з МРЕ, з яких випливає, що у разі, коли модуль втрат дорівнює нулю, криві 2, мінімальні прохідні висоти нерівностей, на резонансних швидкостях руху зменшуються з рівня 0,12...0,14 м до рівня 0,10...0,11 м. При цьому плавність ходу погіршується на усіх швидкостях руху і довжинах нерівностей.

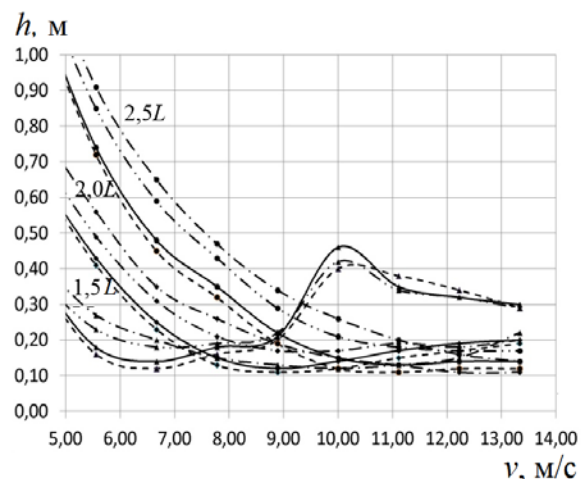


Рис. 16. Швидкісні характеристики СП: оцінка впливу керування модулем втрат шарнірів (модуль пружності має вихідне значення):
 — 1 – вихідне значення модуля;
 - - - 2 – модуль дорівнює нулю;
 - · - · 3 – модуль збільшено у 5 разів;
 - - - - 4 – модуль збільшено у 10 разів

При збільшенні модуля втрат даних шарнірів у 5 разів (криві 3) мінімальні прохідні висоти нерівностей на резонансних швидкостях руху збільшуються з рівня 0,12...0,14 м до рівня 0,17...0,18 м, тобто на 28,6...41,7 %, що впритул наближається до рівня сучасних вимог (0,19...0,24 м). На дорезонансних швидкостях руху плавність ходу покращується на усіх довжинах нерівностей, а на зарезонансних – покращується на нерівностях довжиною 2L і 2,5L та незначно погіршується на нерівностях довжиною 1,5L.

При збільшенні модуля втрат у 10 разів (криві 4) на резонансних швидкостях руху мінімальні прохідні висоти нерівностей незначно знижуються з рівня 0,12...0,14 м до рівня 0,12...0,13 м. На дорезонансних швидкостях руху плавність ходу істотно покращується на усіх довжинах нерівностей, на зарезонансних швидкостях плавність ходу незначно погіршується на нерівностях довжиною 2L і 2,5L і суттєво погіршується на нерівностях довжиною 1,5L.

На рис. 17, 18 наведено результати дослідження впливу спільного керування модулями втрат та пружності шарнірів з МРЕ нижніх важелів підвіски на плавність ходу ТЗ.

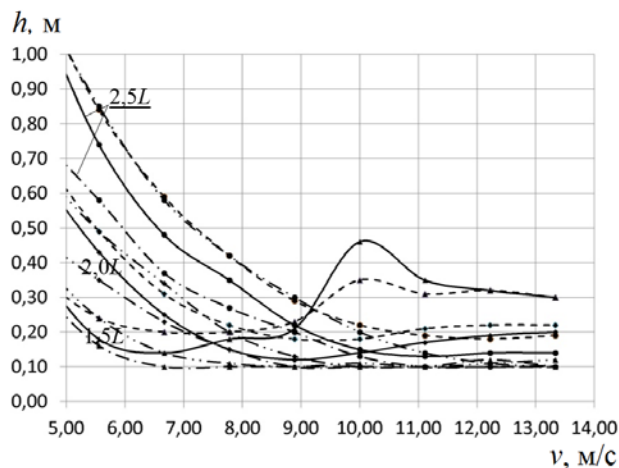


Рис. 17. Швидкісні характеристики СП: оцінка впливу спільного керування модулями втрат та пружності шарнірів нижніх важелів:
 — 1 – вихідне значення модулів втрат та пружності;
 - - - 2 – модуль втрат збільшено у 5 разів, модуль пружності дорівнює нулю;
 - · - · 3 – модулі втрат і пружності збільшено у 5 разів;
 - - - - 4 – модуль втрат збільшено у 5 разів, модуль пружності збільшено у 10 разів

Відповідно до рис. 17, для варіанта «модуль втрат збільшено у 5 разів, модуль пружності дорівнює нулю», криві 2, мінімальні прохідні висоти нерівностей, підвищуються з рівня 0,12...0,14 м до рівня 0,17...0,19 м, тобто на 35,7...41,7 %, що є близьким до рівня сучасних вимог (0,19...0,24 м).

Варіант «модулі втрат і пружності збільшено у 5 разів» (криві 3) дозволяє суттєво (до 43 %) підвищити плавність ходу на дорезонансних швидкостях руху на усіх довжинах нерівностей.

Варіант «модуль втрат збільшено у 5 разів, модуль пружності збільшено у 10 разів» (криві 4) призводить до погіршення плавності ходу в усьому діапазоні швидкостей, на усіх довжинах нерівностей.

З графіків, наведених на рис. 18, випливає, що зростання модуля втрат у 10 разів (графік 2) призводить до покращення плавності ходу на нерівностях довжиною $1,5L$ на дорезонансних швидкостях, та погіршенню – на зарезонансних швидкостях руху. Цей варіант забезпечує зростання мінімальних прохідних висот нерівностей (на швидкості 9 м/с) з рівня 0,12...0,14 м лише до рівня 0,13...0,14 м, тобто гірше, ніж у попередньому випадку.

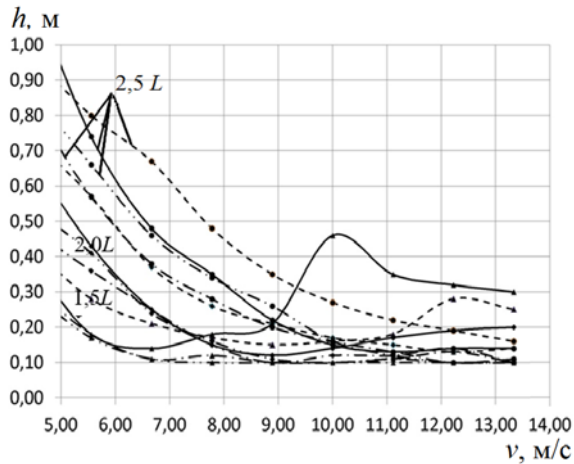


Рис. 18. Швидкісні характеристики СП: оцінка впливу спільного керування модулями втрат та пружності шарнірів нижніх важелів:

- 1 – вихідні значення модулів;
- 2 – модуль втрат збільшено у 10 разів, модуль пружності дорівнює нулю;
- · - · - 3 – модуль втрат збільшено у 10 разів, модуль пружності збільшено у 5 разів;
- · — · — 4 – модулі втрат і пружності збільшено у 10 разів

Варіанти «модуль втрат збільшено у 10 разів, модуль пружності збільшено у 5 разів» (графік 3) та «модулі втрат і пружності збільшено у 10 разів» (графік 4) демонструють, що таке збільшення модулів призводить до суттєвого погіршення плавності ходу в усьому діапазоні швидкостей та нерівностей.

Обговорення результатів. Аналіз графіків, які представлено на рис. 14, доводить, що характеристики пружних шарнірів важелів СП ТЗ вагомо впливають на його плавність ходу і керування їх модулями втрат та пружності доцільно впроваджувати на ТЗ. З метою зниження енергоспоживання та запобігання перегріву вузлів, дане керування доцільне на резонансних швидкостях руху при подоланні ділянок місцевості з важкими дорожніми умовами, без зменшення швидкості руху.

Доцільним є керування у більшій мірі модулем втрат, ніж модулем пружності, бо збільшення останнього може призвести до погіршення плавності ходу. Необхідно створювати МРЕ із властивостями, при яких, у разі керування, збільшення модуля втрат не супроводжується зростанням модуля пружності.

Проведені експериментальні дослідження дозволили збільшити модуль втрат у зразках МРЕ лише вдвічі, однак розрахункові дослідження показали бажаність його 5-кратного збільшення. Вирішити дану проблему можливо або шляхом збільшення кількості керованих шарнірів, встановивши їх і на верхніх ва-

желях підвіски, або застосувавши іншу технологію виготовлення МРЕ, яка забезпечить п'ятикратне збільшення модуля втрат під дією магнітного поля з індукцією до 1,5 Тл.

Отримані значення збільшення (відносно серійного ТЗ) модулів втрат і пружності та побудовані швидкісні характеристики СП дозволяють розробити вимоги до законів керування характеристиками шарнірів з МРЕ, в залежності від режиму руху (дорезонансного, резонансного або зарезонансного) та довжини нерівностей.

Сформулюємо ці вимоги до законів керування характеристиками пружних шарнірів з МРЕ у СП:

- керування доцільно реалізувати тільки на резонансних швидкостях руху ТЗ;
- здійснювати керування доцільно виключно модулем втрат МРЕ шарнірів важелів СП;
- збільшувати модуль втрат рекомендується не більше, ніж у 5 разів;
- процеси керування повинні відбуватися не довше за 10 с, та мати прийнятні паузи в часі між ними.

Висновки та рекомендації.

1. Вперше виготовлено зразки із магніторологічних еластомерів з параметрами, які придатні для використання у шарнірах важелів систем підресорювання транспортних засобів.

2. Розроблено оригінальний стенд, на якому досліджено статичні характеристики жорсткості та демпфірування виготовлених зразків. Встановлено, що керуюче магнітне поле у більшій мірі впливає на модуль втрат, ніж на модуль пружності. Вперше показано, що індукція $B = 0,6$ Тл керуючого магнітного поля викликає збільшення коефіцієнта жорсткості (та модуля пружності) на 25 %, що викликало зростання частоти власних коливань з 2,5 до 2,7 Гц, (на 8 %). Коефіцієнт демпфірування при цьому збільшився на 118 % (з 0,038 до 0,083), тобто в 4,7 рази більше за коефіцієнт жорсткості.

3. У процесі динамічних випробувань на розробленому стенді, за допомогою виготовленої сучасної вимірювальної апаратури, вперше виявлено, що при включенні керуючого магнітного поля стала часу вільних коливань маси на пружних елементах із магніторологічних еластомерів зменшилася з 1,48 до 0,78 с. Перехідний процес практично завершувався за 2,34 с. Амплітуди резонансних коливань маси на пружних елементах із магніторологічних еластомерів при включенні керуючого магнітного поля $B = 0,6$ Тл, зменшуються вдвічі за 2,34 с.

4. Розроблено та запатентовано оригінальні конструкції керованого пружного шарніру з магніторологічних еластомерів та пристроєм для створення керуючого магнітного поля. Визначено параметри, які забезпечили рівномірний (в межах 10 %) розподіл магнітної індукції в перерізах шарнірів. Для досягнення магнітної індукції у магніторологічному еластомері на рівні 0,6 Тл, визначено величину магнітопрушійної сили (15 кА), обрано щільність струму у котушці пристрою ≤ 10 А/мм², при терміні роботи до 10 с.

5. Сформульовано вимоги щодо законів керування, які дозволяють підвищити плавність ходу транспорт-

них засобів в залежності від швидкості та довжини нерівностей більше ніж на 40 %.

6. Вперше встановлено, що керування модулем втрат шарнірів з магніторологічних еластомерів підвіски транспортних засобів в більшій мірі впливає на підвищення плавності ходу, ніж керування їх модулем пружності.

7. Визначено раціональні межі відносної зміни модуль втрат шарнірів з магніторологічних еластомерів (не більше ніж у 5 разів) при здійсненні їх керування; рекомендовано їх використовувати при формулюванні вимог до магніторологічних еластомерів, та розробці конструкцій керованих вузлів систем підресорювання.

8. За результатами проведених досліджень на спосіб керування, конструкції шарнірів з магніторологічних еластомерів та підвіску отримано 4 патенти України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ginder J.M., Nichols M.E., Elie L.D., Tardiff J.L. Magnetorheological elastomers: properties and applications // *Proceeding of SPIE*. – 1999. – vol.3675. – pp. 131-138.
2. Lokander M., Stenberg B. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials // *Polymer Testing*. – 2003. – vol.22. – no.3. – pp. 245-251. doi: **10.1016/s0142-9418(02)00043-0**.
3. Jolly M.R., Carlson J.D., Muñoz B.C., Bullions T.A. The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 1996. – vol.7. – no.6. – pp. 613-622. doi: **10.1177/1045389x9600700601**.
4. Li W.H., Zhang X.Z., Du H. Magnetorheological elastomers and their applications // *Book Chapter in Advanced Structured Materials*. – 2013. – vol.I. – pp. 357-374. doi: **10.1007/978-3-642-20925-3_12**.
5. Böse H., Röder R. Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2009. – vol.149. – p. 012090. doi: **10.1088/1742-6596/149/1/012090**.
6. Горбунов А.И., Михайлов В.П., Степанов Г.В., Борин Д.Ю., Андриянов А.А., Темнов Д.В., Семеренко Д.А. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение»*. – 2008. – №1(70). – С. 90-107.
7. Михайлов В.П., Шаков К.Г., Селиваненко А.С., Базиненков А.М. Управление виброизоляции прецизионного оборудования // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2012. – №9. – С. 1-12. doi: **10.7463/0912.0454475**.
8. Chen L., Gong X.L., Li W.H. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers // *Smart Materials and Structures*. – 2007. – vol.16. – no.6. – pp. 2645-2650. doi: **10.1088/0964-1726/16/6/069**.
9. Gong X.L., Chen L., Li J.F. Study of utilizable magnetorheological elastomers // *International Journal of Modern Physics B*. – 2007. – vol.21. – no.28n29. – pp. 4875-4882. doi: **10.1142/s0217979207045785**.
10. Дущенко В.В., Маслів А.О. Дослідження керуючого магнітного поля та вибір конструкції пружного шарніра з втулкою з магніторологічного еластомеру підвіски колісного бронетранспортера // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Транспортне машинобудування. – 2017. – №5(1227). – С. 173-178.
11. https://www.google.com/search?q=кривые+намагничивания+ферромагнитных+материалов&rlz=1C2JZAP_ruUA74UA755.
12. Krautz M., Werner D., Schrödner M., Funk A., Jantz A., Popp J., Eckert J., Waske A. Hysteretic behavior of soft mag-

netic elastomer composites // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2017. – vol.426. – pp. 60-63. doi: **10.1016/j.jmmm.2016.11.048**.

13. Дущенко В.В., Маслів А.О. Удосконалення конструкції шарніру із магніторологічного еластомеру важеля керованої підвіски транспортного засобу // *Механіка та машинобудування*. – 2017. – №1. – С. 90-97.

14. Дущенко В.В., Маслів А.О. Патент України на корисну модель 110476. Підвіска з регулюванням жорсткості та демпфірування. Заявл. 11.04.16; опубл. 10.10.16. Бюл. №19.

15. Маслів А.О., Дущенко В.В., Любарський Б.Г., Маслів В.Г. Патент України на корисну модель 115131. Підвіска транспортного засобу. Заявл. 22.07.16; опубл. 10.04.17. Бюл. №7.

16. Дущенко В.В., Маслів А.О. Стенд для експериментального дослідження впливу магнітного поля на модуль пружності та модуль втрат магніторологічних еластомерів // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Транспортне машинобудування. – 2018. – №29(1305). – С. 46-50.

17. Маслів А.О., Дущенко В.В., Маслів В.Г. Патент України на корисну модель 128767. Стенд для дослідження впливу магнітного поля на характеристики жорсткості, демпфірування та модуль пружності магніторологічних еластомерів. Заявл. 26.03.2018; опубл. 10.10.2018. Бюл. №19.

18. Kallio M. The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers. – VTT Publications, 2005. – 149 pp.

19. Паньков А.А. Магнитодеформационный эффект эластомера с намагниченными полидисперсными сферическими включениями // *Журнал радиоэлектроники*. – 2015. – №4. – 15 с.

20. Дущенко В.В., Маслів А.О., Маслів В.Г. Патент України на корисну модель 128458. Спосіб поліпшення плавності руху транспортного засобу. Заявл. 20.11.2017; опубл. 25.09.2018. Бюл. №8.

21. Александров Е.Е., Волонцевич Д.О., Дущенко В.В. Математическое моделирование процессов возмущенного движения агрегатов и систем бронетанковой техники. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – 354 с.

REFERENCES

1. Ginder J.M., Nichols M.E., Elie L.D., Tardiff J.L. Magnetorheological elastomers: properties and applications. *Proceeding of SPIE*, 1999, vol.3675, pp. 131-138.
2. Lokander M., Stenberg B. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials. *Polymer Testing*, 2003, vol.22, no.3, pp. 245-251. doi: **10.1016/s0142-9418(02)00043-0**.
3. Jolly M.R., Carlson J.D., Muñoz B.C., Bullions T.A. The magnetoviscoelastic response of elastomer composites consisting of ferrous particles embedded in a polymer matrix. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1996, vol.7, no.6, pp. 613-622. doi: **10.1177/1045389x9600700601**.
4. Li W.H., Zhang X.Z., Du H. Magnetorheological elastomers and their applications. *Book Chapter in Advanced Structured Materials*, 2013, vol.I, pp. 357-374. doi: **10.1007/978-3-642-20925-3_12**.
5. Böse H., Röder R. Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol.149, p. 012090. doi: **10.1088/1742-6596/149/1/012090**.
6. Gorbunov A.I., Mikhailov V.P., Stepanov G.V., Borin D.Yu., Adrianov A.A., Temnov D.V., Semerenko D.A. Investigation of properties and new application of magnetic silicon composites. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2008, no.1(70), pp. 90-107. (Rus).
7. Mihailov V.P., Shakov K.G., Selivanonko A.S., Bazinenkov A.M. Vibration isolation control in precision equipment. *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, vol.12, no.9, pp. 1-12. (Rus). doi: **10.7463/0912.0454475**.

8. Chen L., Gong X.L., Li W.H. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures*, 2007, vol.16, no.6, pp. 2645-2650. doi: 10.1088/0964-1726/16/6/069.
9. Gong X.L., Chen L., Li J.F. Study of utilizable magnetorheological elastomers. *International Journal of Modern Physics B*, 2007, vol.21, no.28n29, pp. 4875-4882. doi: 10.1142/s0217979207045785.
10. Dushchenko V.V., Masliev A.O. Research of the magnetic field and the choice of the construction of an elastic joint with the sleeve of the magnetorheological elastomer suspension of wheeled armored vehicle. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Transport machine building*. – 2017. – no.5(1227). – pp. 173-178. (Ukr).
11. Available at: https://www.google.com/search?q=кривые+намагничивания+ферромагнитных+материалов&rlz=1C2JZAP_ruUA747UA755 (accessed 20 May 2018).
12. Krautz M., Werner D., Schrödner M., Funk A., Jantz A., Popp J., Eckert J., Waske A. Hysteretic behavior of soft magnetic elastomer composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, vol.426, pp. 60-63. doi: 10.1016/j.jmmm.2016.11.048.
13. Dushchenko V.V., Masliev A.O. Improvement of the construction of hinge using magnetorheological elastomers of lever of controlled suspension of the vehicle. *Mechanics and mechanical engineering*, 2017, no.1, pp. 90-97. (Ukr).
14. Dushchenko V.V., Masliev A.O. *Pidviska z reguluvannyam zhorstkosti ta dempfirovannya* [Suspension with adjustable stiffness and damping]. Patent UA, no.110476, 2016. (Ukr).
15. Masliev A.O., Dushchenko V.V., Ljubarskij B.G., Masliev V.G. *Pidviska transportnogo zasobu* [Vehicle suspension]. Patent UA, no.115131, 2017. (Ukr).
16. Dushchenko V.V., Masliev A.O. Stand for experimental study of the effect of magnetic field on the elastic modulus and a module of losses of magnetorheological elastomers. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Transport machine building*, 2018, no.29(1305), pp. 46-50. (Ukr).
17. Masliev A.O., Dushchenko V.V., Masliev V.G. *Stend dlia doslidzhennia vplyvu mahnitnoho polia na kharakterystyky zhorstkosti, dempfirovannia ta modul pruzhnosti mahnitoreolohichnykh elastomeriv* [A stand for studying the influence of a magnetic field on the characteristics of stiffness, damping, and the elastic modulus of magnetorheological elastomers]. Patent UA, no.128767, 2018. (Ukr).
18. Kallio M. *The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers*. VTT Publications, 2005. 149 pp.
19. Pankov A.A. Magnetodeformation effect of an elastomer with magnetized polydisperse spherical inclusions. *Journal of Radio Electronics*, 2015, no.4, 15 p. (Rus).
20. Dushchenko V.V., Masliev A.O., Masliev V.G. *Sposib polipshennia plynosti rukhu transportnogo zasobu* [A method for improving the smoothness of the vehicle]. Patent UA, no.128458, 2018. (Ukr).
21. Aleksandrov E.E., Volontsevich D.O., Dushchenko V.V. *Matematicheskoe modelirovanie processov vozmushhennogo dvizhenija agregatov i sistem bronetankovoj tehniky* [Mathematical modeling of processes of disturbed movement of units and systems of armored vehicles]. Kharkiv, «KhPI» Publ., 2012. 354 p. (Rus).

Надійшло (received) 11.04.2019

Дущенко Владислав Васильович¹, д.т.н., проф.,
 Маслієв В'ячеслав Георгійович¹, д.т.н., проф.,
 Нанівський Роман Антонович², к.т.н., ст. викл.,
 Маслієв Антон Олегович¹, аспірант,

¹Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»,
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
 тел/phone +380 57 7076355,
 e-mail: dushchenko@ukr.net

²Національна академія сухопутних військ
 імені гетьмана Петра Сагайдачного,
 79026, Львів, вул. Героїв Майдану, 32,
 тел/phone +380 96 9409559,
 e-mail: roman_nani@ukr.net

V.V. Dushchenko¹, V.G. Masliev¹, R.A. Nanyvskyi², A.O. Masliev¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy,
 32, Heroes of Maidan Str., Lviv, 79026, Ukraine.

Application of magnetorheological elastomers for performance control of cushioning systems for wheeled vehicles.

The purpose The aim of the work is to study the influence of the control of the elastic and damping characteristics of the cushioning system based on the use of magnetorheological elastomers on the smoothness of the course of wheeled transport vehicles. *The technique*. The research used the methods of: magnetic field theory, the theory of vehicle suspension, experiment theory planning, and the FEMM code for studying magnetic field characteristics and mathematical modeling of wheeled vehicle movement along roughness in the Delphi environment.

Results. Designed, researched and patented designs of elastic hinges of the suspension arms with magnetorheological elastomers. The relative boundaries of changes in the elastic modules and losses of these hinges are determined when controlling the characteristics of the suspension in order to improve the smoothness of the wheeled vehicle. *Scientific novelty*. For the first time, the feasibility of using magnetorheological elastomers to control the elastic and damping characteristics of the cushioning system of wheeled vehicles has been investigated, and the requirements for control laws have been determined, which make it possible to increase smoothness by more than 40 %; it is established that the control of the loss modulus has a greater effect on the improvement of smoothness of motion than the control of the elastic modulus. *Practical value*. The design has been developed and the relative boundaries of changes in the modules of elasticity and loss of hinges with magnetorheological elastomers during their control have been determined, which will make it possible to formulate requirements for elastomers when developing promising hinge designs for vehicle suspension systems. References 21, figures 18.

Key words: magnetorheological elastomer, control magnetic field, modulus of elasticity, loss modulus, wheeled vehicle, cushioning system, elastic hinges, suspension performance control.