УДК 629.1.032 https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.11

В.В. Дущенко, Б.Г. Любарський, А.О. Маслієв, Р.А. Нанівський, В.Г. Маслієв, О.М. Агапов, Д.І. Якунін

Підвищення демпфуючих властивостей виконавчого магнітореологічного пристрою системи керування підвіски транспортного засобу

Проблема. *Відповідно до одного із напрямків вирішення проблеми підвищення плавності ходу транспортних засобів, запропоновано керовану підвіску, яку створено на базі застосування «інтелектуальних» матеріалів – магнітореологічних еластомерів, механічні властивості яких, зокрема демпфування, можна змінювати за допомогою керуючого магнітного поля. Це реалізовано за допомогою виконавчого магнітореологічного пристрою системи керування підвіски, який має вигляд пружної втулки важеля підвіски, що складається із декількох електрично поєднаних у послідовне коло тороподібних котушок (з осереддям із магнітореологічного еластоміру). Пристрій живиться електричним струмом, величина якого керується оператором, або автоматично, в залежності від дорожнього профілю та режиму руху. Виконавчі магнітореологічні пристрої (пружні втулки) розміщують у важелях підвіски замість штатних гумових і поєднують із керованим джерелом струму. Таким чином, підвіска стає керованою, що надає можливість встановлювати необхідне демпфування коливань корпусу транспортного засобу для підвищення його плавності ходу. Недоліком попередніх конструкцій виконавчого магітореологічного пристрою є недостатня величина індукції та нерівномірність її розподілу в межах пружних втулок. Внаслідок цього демпфуючі властивості таких керованих підвісок недостатньо ефективні, що знижує можливості підвищення плавності ходу транспортних засобів.* ***Метою*** *роботи є підвищення демпфуючих властивостей виконавчого магнітореологічного пристрою системи керування підвіски транспортного засобу, що збільшить ефективність керування.* ***Завдання.*** *Удосконалити конструкцію виконавчого магнітореологічного пристрою, провести розрахунки середньої по перерізу пристрою величини індукції магнітного поля та її розподілу, скласти залежність показника демпфування пристрою від індукції магнітного поля, порівняти показники демпфування удосконаленого пристрою з попередніми.* ***Методологія****. Задачі дослідження вирішувалися з використанням методів теорії магнітного поля та програмних пакетів SOLIDWORKS® і FEMM, а також аналізу залежності демпфуючих властивостей втулок з магнітореологічних еластомірів від індукції магнітного поля. Наведено опис конструкції та принцип дії виконавчого магнітореологічного пристрою системи керування підвіски транспортного засобу, на основі чого розроблено розрахункову схему.* ***Результати*** *розрахунків показали, що середня величина індукції магнітного поля у запропонованій конструкції пристрою досягла 0,85 Т, її розподіл став достатньо рівномірний, а зони, де вона аномально мала, відсутні. Складена вперше залежність показника демпфування від індукції керуючого магнітного поля має ознаки наукової новизни. Отримано, що даний показник для запропонованої конструкції пристрою збільшився на 22 % порівняно з попередніми конструкціями, що підвищить ефективність системи керування та плавність ходу транспортного засобу. Позитивний результат досягнуто завдяки наступним особливостям запропонованої конструкції виконавчого пристрою: пружна втулка складається із декількох, розташованих співвісно, виконуючих пристроїв з анізотропного магнітореологічного еластоміру, у якого конгломерати феромагнітного наповнювача в процесі виготовлення розташовано колінеарно до напрямку кутових деформацій втулки та вектору індукції керуючого магнітного поля, а котушки керування виконано із струмопровідного пружного еластоміру. Спосіб керування, попередні конструкції та конструкцію даної керованої підвіски захищено патентами України. Напрямки подальших досліджень полягають у оптимізації параметрів котушок керування з метою зниження енергоспоживання та їх захисту від перегріву.* Бібл. 20, рис. 10.

Ключові слова: **магнітне поле, виконавчий магнітореологічний пристрій, анізотропний магнітореологічний еластомір, система керування, підвіска транспортного засобу, демпфірування.**

Вступ. Перспективним напрямком вирішення проблеми підвищення плавності ходу транспортних засобів (ТЗ) вважається застосування керованих підвісок (КП). Особливо актуально це для військових машин, як рухаються с відносно високими швидкостями по ґрунтовим дорогам та пересіченій місцевості. Однак, відомі технічні рішення КП характеризуються складністю, високою вартістю та низькою надійністю. Усунення даних недоліків є складною науково-прикладною проблемою, над вирішенням якої працюють фахівці усіх розвинених країн. Одним із варіантів виконавчого пристрою (ВП) КП є гідро демпфер, заповнений магнітореологічною («інтелектуальною») рідиною, властивості якої, зокрема густина, змінюється під впливом магнітного поля. Це дозволяє керувати його демпфуючими властивостями та впливати на плавність руху ТЗ при русі по бездоріжжю. Але широке розповсюдження таких КП стримує проблема, яка обумовлена абразивною дією магнітних часток на взаємодіючі частини ВП, що знижує довговічність, та нестабільністю характеристик магнітної рідини, яка обумовлена осіданням магнітних часток долу, що знижує ефективність керування та плавність руху ТЗ. Вирішити проблему можна шляхом застосування ВП, де рідина замінена на магнітореологічний еластомір (МРЕ), який позбавлений цих недоліків. Використання МРЕ у КП ТЗ було вперше запропоновано авторами – спосіб та конструкції, підтверджено патентами України. Дана робота присвячена удосконаленню виконавчого магнітореологічного пристрою (ВМП) з метою підвищення його ефективності. Він призначений для військових колісних машин, але придатний і для інших ТЗ, наприклад для електротранспорту, що має потужні джерела струму. Його підключають до роботи короткочасно, додатково до основних пружних елементів та демпфуючих пристроїв підвіски у разі необхідності збільшення демпфування при подоланні ділянок з важким дорожнім профілем на резонансних режимах руху. Це дозволяє зберегти необхідну плавності ходу, без зниження швидкості руху. У разі виходу даної КП з ладу, ТЗ залишиться зі звичайною підвіскою і не втратить ходу. Таким чином, вирішуються і актуальні задачі забезпечення високої надійності ТЗ.

МРЕ являють собою суміш пружної матриці (гуми або еластоміру), та феромагнітного наповнювача, наприклад, порошку карбонільного заліза, із розміром часток близько 5 мкм. Суміш полімеризують і отримують МРЕ з рівномірним (ізотропним) розподілом

© В.В. Дущенко, Б.Г. Любарський, А.О. Маслієв, Р.А. Нанівський, В.Г. Маслієв, О.М. Агапов, Д.І. Якунін

частинок в матриці, або з анізотропним, якщо процес полімеризації проведено у магнітному полі. При цьому, частинки наповнювача утворюють конгломерати у вигляді стовпчиків, які розташовуються уздовж ліній індукції магнітного поля.

Відомо, що анізотропні МРЕ більшою мірою змінюють свої пружні та демпфуючі властивості під дією керуючого магнітного поля, ніж ізотропні. Це впливає на амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) коливань підресореного корпусу ТЗ. Збільшення демпфування викликає зменшення амплітуд коливань та пришвидшень і, відповідно, висоти резонансного максимуму АЧХ. Зростання жорсткості підвіски збільшує власну частоту коливань підресореного корпусу на ній. Це порушує співпадіння її з частотою збуджень від нерівностей дорожнього профілю і захищає від виникнення резонансних коливань. Між тим, виникають певні проблеми при використанні МРЕ, що обумовлені складністю отримання необхідної індукції керуючого магнітного поля та рівномірного його розподілу в межах ВМП. Велика кількість публікацій, патентів та прикладів практичного застосування доводить перспективність напрямку вирішення проблеми підвищення плавності ходу ТЗ шляхом застосування КП. У зв'язку з цим, актуальними є науково-практичні роботи, що спрямовані на удосконалення КП, зокрема, шляхом використання у них ВМП, на поліпшення демпфуючих властивостей яких спрямовано дану роботу.

Аналіз попередніх досліджень. У роботі [1] стверджується, що подальше підвищення якісних показників ТЗ за рахунок удосконалення систем підресорювання вимагає застосування керування характеристиками їх пружних та демпфуючих пристроїв. Але традиційні матеріали (метали, композитні матеріали, гуми, еластоміри, гази, рідини, тощо), які застосовуються у даних вузлах, вичерпали свої можливості по забезпеченню необхідного керування характеристиками систем підресорювання. Це пов'язано з незмінністю фізичних властивостей і характеристик цих матеріалів, що призводить до складних, високовартісних та ненадійних технічних рішень і стримує впровадження КП на ТЗ.

Вирішити дану актуальну проблему автори пропонують шляхом застосування у КП альтернативних матеріалів, відомих у світі як інтелектуальні матеріали (*smart materials*). Це дозволить спростити технологію виготовлення КП, та сприятиме їх впровадженню на ТЗ. На часі отримали певне розповсюдження КП, у яких робочим елементом є магнітореологічна рідина (МР). Між тим, їй притаманні суттєві недоліки, один з яких полягає у седиментації магнітних частинок в рідині. Автори розглядають кілька заходів щодо оптимізації осадження МР з погляду в'язкості дисперсійного середовища, сили суспендування дисперсної фази та інновацій у добавках. Запропонований активний механізм для вирішення проблеми седиментації обіцяє поліпшити працездатність МР-демпферів, навіть якщо осад зберігається. Але осадження МР можна знизити лише до певної міри [2].

У роботі [3] розглянуто ще один недолік гідро амортизаторів із МР, який пов'язаний із чутливістю до імпульсних навантажень, що небажано при захисті від ударів. Це спричиняє великі сили амортизації, які передаються до корпусу ТЗ та становлять серйозну загрозу для пасажирів та механічних конструкцій. Повідомляється про розробки МР – гідро амортизатор удару з низькою чутливістю до імпульсних навантажень. Аналітичні та експериментальні дослідження довели, що чутливість до удару його зменшилася.

Роботу [4] присвячено тестуванню та моделюванню властивостей ізотропних МРЕ під дією статико-динамічних стискаючих навантажень. На основі силіконового еластоміру виготовлено ізотропні МРЕ з різним вмістом магнітних частинок. Щоб застосувати кероване магнітне поле до МРЕ під час динамічних випробувань, був розроблений електромагніт із індукцією магнітного поля до 0,9 Тл. Петлі гістерезису «напруга – деформація» виготовлених МРЕ були експериментально отримані під дією динамічних стискаючих навантажень у поєднанні з різними статичними попередніми деформаціями. Досліджено вплив вмісту частинок, амплітуд деформацій, статичної попередньої деформації та частоти навантаження на модулі зберігання та втрат МРЕ. Результати показали, що незалежно від прикладеного магнітного поля, деформаційна поведінка МРЕ була в приблизному лінійному в'язко пружному стані, якщо амплітуда деформації була меншою за 7,5 %. Як абсолютний, так і відносний ефект МРЕ зростає зі збільшенням вмісту частинок і зменшується зі збільшенням амплітуди деформації. Зміна частоти навантаження майже не впливає на МРЕ. Запропоновано емпіричні моделі для прогнозування модулів зберігання та втрат МРЕ, як функцій індукції магнітного поля, вмісту магнітних частинок, амплітуди деформації, частоти, попередньої деформації та навантаження. Моделі можуть дати ефективні прогнози модулів зберігання та втрат МРЕ для застосованих у цій роботі умов навантаження.

У роботі [5] розглядається характеристика стиснення МРЕ на основі кремнію. Розроблений електромагніт дозволяє проводити динамічні випробування на стиск до 300 Гц зразків розміром 40 × 40 × 8 мм. Досягнуто магнітну індукцію близько 1 Тл, і отримано прогнозоване збільшення динамічної жорсткості МРЕ. Електромагніт можна використовувати для виготовлення та затвердіння анізотропних МРЕ.

У роботі [6] відзначено, що МРЕ мають широкі можливості для застосування на транспорті у якості амортизаторів підвіски, завдяки відносно меншій складності і вартості конструкцій поглинаючих пристроїв на їх основі, екологічній досконалості та відсутності недоліків, що притаманні МР. Але автори не наводять характеристик МРЕ та результатів їх використання.

Робота [7] присвячена отриманню залежності відносної магнітної проникності від концентрації наповнювача МРЕ. Її максимальне значення (6,6) отримано для 50 % об'ємної концентрації частинок. Пояснення підвищення магнітної проникності у роботі відсутнє.

Оцінку впливу керуючого магнітного поля на віброізолюючі властивості МРЕ досліджено у роботі [8] та численному рядку інших робіт. Виявлено значне поліпшення демпфуючих властивостей МРЕ під впливом магнітного поля.

У роботі [9] відзначено, що відомий метод виготовлення МРЕ займає більше доби, оскільки матрицям з натурального каучуку або силіконового каучуку потрібно тривалий час для полімеризації. Запропоновано використовувати як матрицю (полі)диметилсилоксан з полімеризацією його при високій температурі. Це скорочує час виготовлення МРЕ до 90 хвилин. Дослідження динамічних властивостей виготовленого за новим методом МРЕ дали позитивні результати.

Вплив зміни модуля Юнга (0,14 – 14,6 МПа) на фізичні характеристики МРЕ досліджено у роботі [10]. Також досліджено залежність демпфуючих властивостей композитів від вмісту частинок (7, 10, 14, 21, 31 об. %), та від механічних властивостей МРЕ. Підвищення демпфуючих властивостей виникає у певної частки магнітних частинок, що можна пояснити магнітним обміном між ними. Демпфуючи властивості (гістерезис) гірші у МРЕ з більшим модулем Юнга. Виявлено нерівномірну участь магнітних часток МРЕ у гістерезисі.

У роботі [11] запропонована лінійна магнітов'язкопружна модель для анізотропних МРЕ, яка дозволяє визначати вплив магнітного поля на динамічний модуль зсуву в залежності від напруженості та частоти магнітного поля. Похибки між експериментальними значеннями та розрахунками, що отримано шляхом моделювання, не перевищують 10 %.

У роботі [12] запропоновано метод розрахунку еластомірних конструкцій, що враховує їх особливості. У процесі розрахунку знаходиться вектор вузлових переміщень, на основі якого визначаються поля деформацій і напруг та їх значення.

Дослідження конічного віброізолятора з МРЕ довели його ефективність: він забезпечує надійну віброізоляцію завдяки збільшенню в процесі керування частоти коливань на 46,29 % та керуючих зусиль до 75 Н. Відзначено, що віброізолятори із МРЕ мають велике споживання енергії та нерентабельне виробництво [13].

У роботі [14] наведено результати досліджень датчика деформацій, який створено на основі дротового МРЕ, що містить поліуретанову губку зі срібним нанодротом (AgNW), та частинки карбонільного заліза і полидиметилсилоксан. Дослідження виявили, що відносна зміна його опору досягала 91,8 % при деформації 20 % при додачі керуючого магнітного поля 0,428 Тл. Є перспектива використання даного матеріалу в інтелектуальних пристроях, композитних електродах та м'яких датчиках.

У роботі [15] наведено результати досліджень датчика у формі диска (феромагнітний маркер), який вбудовано у циліндричний МРЕ. Його тривимірне зміщення оцінюється шляхом моніторингу змін індуктивності чотирьох котушок індуктивності. Дослідження котушок індуктивності виявили її монотонну зміну та лінійність відносно прикладеної нормальної сили та сили зсуву. Зроблено висновок про ефективність використання МРЕ у датчиках.

Результати досліджень датчика магнітного поля, що створений на основі МРЕ, наведено у роботі [16]. Датчик можна використовувати для вимірювання однорідного магнітного поля. Датчик демонструє швидкий відгук (20 мс), та гарні характеристики виявлення магнітного поля в діапазоні від 40 до 100 мТл.

У роботі [17] наведено результати досліджень адаптивних поглиначів, у яких використано властивість зсуву резонансу шляхом використання МРЕ. Відомо, що пасивні нелінійні поглиначі мають ширшу ефективну смугу частот. Автори об'єднали ці дві характеристики в гібридному МРЕ-поглиначі, який при цьому може зміщувати свою власну частоту і має ширшу смугу поглинання. Результати досліджень довели, що адаптивність гібридного поглинача забезпечується завдяки МРЕ.

Аналіз наведених досліджень показав, що недостатньо розкрито залежність демпфуючих властивостей ВМП від спрямування: конгломератів наповнювача до його деформацій та до вектора індукції керуючого магнітного поля.

У зв'язку з цим було проведено комплексні дослідження: розрахункові – шляхом комп'ютерного моделювання розподілу магнітного поля у ВМП підвіски ТЗ, та натурні – пружних зразків із МРЕ (для порівняння із гуми) на динамічному стенді. Зразки мали діаметр 20 мм, центральний отвір з діаметром 8 мм і товщину 10 мм; вміст карбонільного заліза (за об'ємом) складав 40 %. Частота власних коливань маси на цих пружних зразках складала близько 2 Гц. З урахування досвіду, що наведений у роботі [11], зразки виготовлялися із МРЕ з анізотропною структурою: їх було полімерізовано у магнітному полі. Напрямок вектору цього поля у одної частини зразків був ортогональним, а у другої – колінеарним до напрямку керуючого магнітного поля. Демпфуючі властивості зразків оцінювалися за усередненим відносним показником демпфування D

$$D = [\ln(A_1 / A_2)] / 2\pi, \qquad (1)$$

де A_1 та A_2 – послідовні амплітуди на осцилограмах власних коливань.

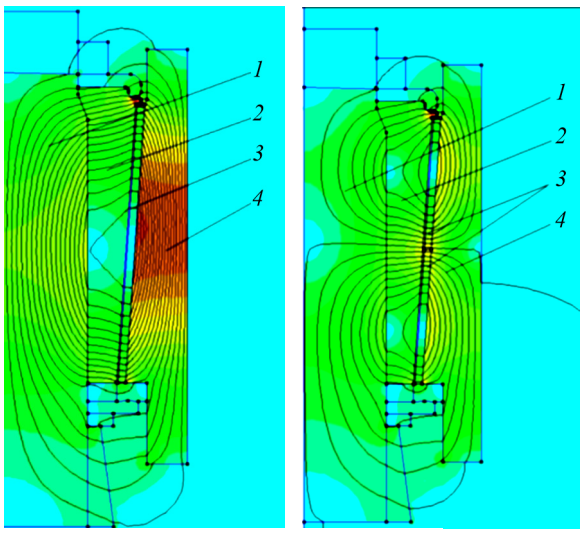
Виявлено, що при ортогональному спрямуванні вектора керуючого магнітного поля (0,6 Тл) до напрямку конгломератів наповнювача зразків, відносний показник демпфування складав 0,04 – 0,05, а при колінеарному 0,071 – 0,083, тобто значно більше.

Також проводилася розробка та комп'ютерне моделювання конструкцій підвісок ТЗ з ВМП [18, 19].

На рис. 1 наведено візуалізацію керуючого магнітного поля у вигляді магнітних силових ліній на перерізах за першим (*a*) та другим (*b*) варіантами пружного шарніру підвіски з ВМП. Керуюче магнітне поле створювалося струмом котушки керування *3*, яку розташовано на зовнішній поверхні ВМП. Це дозволило розмістити її в габаритах серійного шарніру *4*, що спрощувало заміну елементу із гуми на ВМП.

Виявлено, що індукцію керуючого магнітного поля в межах ВМП (позиція *2*) розподілено нерівномірно – вона менше за 0,1 Тл на значній площі у середині, та досягає 0,6 Тл біля торцевих частин.

Це означає, що близько 20 % від об'єму ВМП не приймає участі у створенні демпфуючої сили, що відповідно знижує ефективність керування підвіскою [10]. Розділення котушки керування на дві частини у варіанті (*b*) несуттєво змінило картину.



a *b*

Рис. 1. Візуалізація керуючого магнітного поля за перерізами ВМП за першим (*a*) та другим (*b*) варіантами конструкції шарніру: *1* – вісь шарніра; *2* – ВМП; *3* – котушка керування; *4* – шарнір

Середня індукція склала у обох варіантах близько 0,25 Тл, тобто значно менше за індукцію, при якій починається магнітне насичення часток наповнювача ВМП. У обох варіантах не вдалося спрямувати вектор індукції керуючого магнітного поля колінеарно до напрямку деформацій ВМП: вони є ортогональними.

Виявлено виникнення з торцевих частин пружного шарніру «магнітних містків», де індукція перевищувала 1 Тл. Тому прилеглі частини магнітного кола досягали насичення, що заважало збільшенню індукції керуючого магнітного поля.

У третьому варіанті конструкції котушку керування було розташовано з торця ВМП, що дозволило збільшити кількість витків проводу у неї та, відповідно, магніторушійну силу (МРС) (рис. 2).

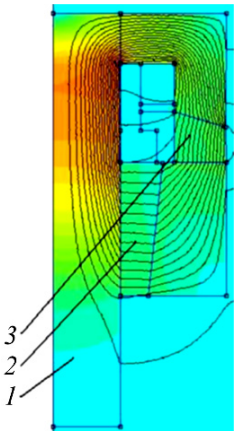


Рис. 2. Візуалізація керуючого магнітного поля по ВМП за третім варіантом його конструкції: *1* – вісь шарніра; *2* – циліндрична частина ВМП; *3* – торцева частина ВМП

ВМП розділено на дві частини: першу (торцеву) – у вигляді конічного кільця, та другу – у вигляді конічного циліндру на осі обертання шарніру. Досягнуто колінеарність вектора керуючого магнітного поля та спрямування конгломератів магнітних часток. Це має підвищити до 21 % фактор загасання коливань у порівнянні з ізотропним ВМП [9, 11].

Дослідження виявило, що у цьому ВМП виключено частини, де індукція керуючого магнітного поля занадто мала. Завдяки цьому досягнуто більш високе її середнє значення (0,6 Тл). Але при цьому не вдалося досягти колінеарності вектору індукції керуючого магнітного поля, який дотичний до магнітних силових ліній, з напрямком деформацій ВМП, який ортогональний до них.

В усіх варіантах на торцевих частинах виникають «магнітні містки», що заважає збільшувати індукцію керуючого магнітного поля. Все це вимагало подовження пошуку більш досконалої конструкції ВМП.

На рис. 3 наведено схему підвіски ТЗ з ВМП.

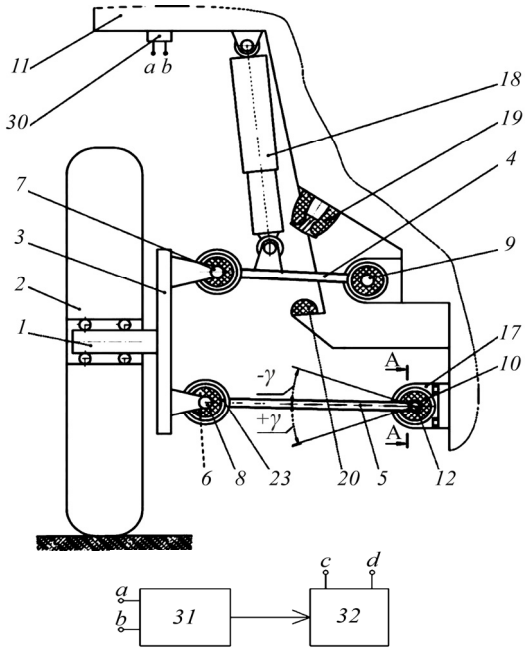


Рис. 3. Схема підвіски ТЗ з ВМП: *1* – вісь; *2* – колесо; *3* – поворотний кулак; *4* – верхній важіль; *5* – нижній важіль; *6* – ВМП; *7* – *10* – вісі; *11* – підресорений корпус; *12* – торсіонний вал; *17* – кронштейн; *18* – гідравлічний амортизатор (ГА); *19*, *20* – упори; *23* – ВМП КП; *30* – блок датчиків; *31* – блок керування; *32* – джерело струму

Метою роботи є підвищення демпфуючих властивостей ВМП системи керування підвіски ТЗ, шляхом удосконалення його конструкції.

Для досягнення мети поставлено завдання:

- провести аналіз та порівняння відомих ВМП та розробити нову, удосконалену конструкцію;
- визначити середнє за перерізом ВМП значення та розподіл індукції керуючого магнітного поля;
- скласти залежність показника демпфування ВМП від індукції керуючого магнітного поля;
- порівняти показники демпфування розробленого ВМП з відомими конструкціями.

Методика проведення досліджень полягала у чисельному розрахунку магнітного поля, що виникає у МРЕ пристрої системи керування підвіски ТЗ, за допомогою програмних пакетів SOLIDWORKS® та FEMM, та визначенню демпфуючих властивостей підвіски на підставі виявленої у попередніх роботах залежності показника демпфування від індукції керуючого магнітного поля.

Об'єктом досліджень є удосконалений ВМП, який складається з котушки у вигляді тороїда, осереддя

якої виконано з анізотропного МРЕ, а котушка отримує струм від блоку живлення, при цьому значення струму встановлюється блоком керування. Дана конструкція захищена патентом України [20]. ВМП *23* (рис. 3) може бути встановлено на висях *7 – 10*.

Слід зауважити, що відтворити анізотропний ВМП з напрямками конгломератів наповнювача, які співпадають одночасно з усіма різноманітними деформаціями пружної втулки при русі ТЗ, неможливо. Тому було створено ВМП, напрямок конгломератів наповнювача якого співпадає лише з напрямком кутових деформацій пружних втулок.

Розглянемо роботу ВМП в КП. Жорсткість КП визначається як сума приведених до колеса жорсткостей торсіонного вала *12* та ВМП *6*, які можуть встановлюватися в усіх (або певній частині) шарнірів важелів. Демпфуючі сили ГА *18* та ВМП *6* приводяться до вісі колеса і складаються. Керуюче магнітне поле створюється струмом *I* у котушках керування *24*, які електрично поєднано у послідовне коло (рис. 4 – 6).

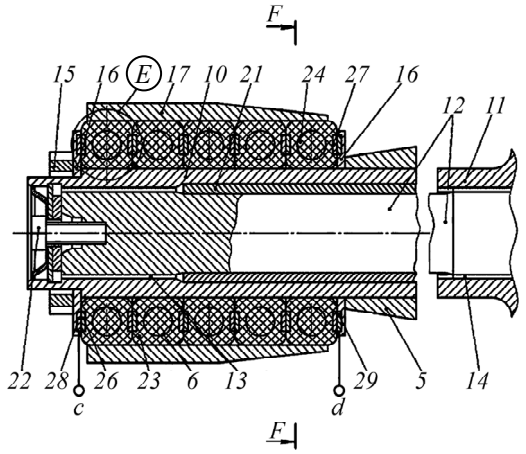


Рис. 4. Переріз *А-А* (за рис. 3): *6* – пружна втулка із п'яти ВМП; *10* – вісь; *11* – підресорений корпус; *12* – торсіонний вал; *13*, *14* – шліцьові з'єднання; *15* – гайка; *16* – шайба; *17* – кронштейн; *21* – втулка; *22* – болтове кріплення; *23* – ВМП у вигляді тороїда; *24* –котушки керування; *26 – 29* – контактні кільця

Дане поле намагнічує феромагнітні частинки наповнювача ВМП і вони починають взаємодіяти між собою, стискаючи пужну матрицю, яка розташована між ними. Це викликає збільшення сил тертя між молекулярними структурами у матриці та, відповідно, і демпфуючих сил у підвісці, пропорційно до струму *I*.

Процес регулювання коливань підресореного корпусу відбувається наступним чином. Найбільш небезпечними вважаються періодичні нерівності, які на відповідній швидкості руху викликають резонансні коливання. При цьому колесо *2* переміщується по вертикалі із частотою нерівностей і передає переміщення через вісь *1* на кулак *3*, верхній *4* та нижній *5* важелі, які обертаються відносно вісей *7 – 10*, і викликають кутові деформації $\pm\gamma$ ВМП *6* на даних вісях (рис. 3).

Використання анізотропного МРЕ, у якого конгломерати феромагнітного наповнювача в процесі виготовлення розташовано колінеарно до напрямку кутових деформацій ВМП *6* та вектору індукції керуючого магнітного поля, забезпечує отримання найбільшого його впливу на їх демпфуючі властивості (рис. 6).

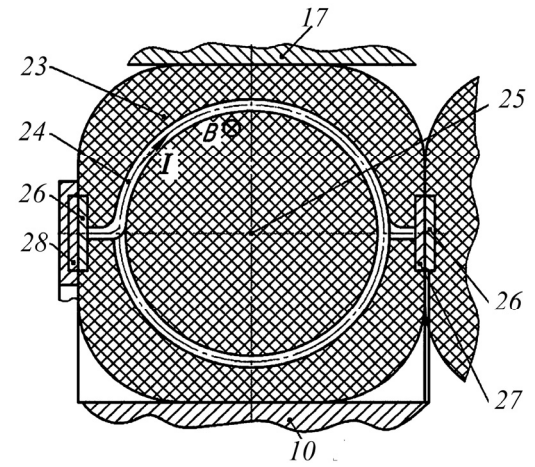


Рис. 5. Вузол *E* (за рис. 4): стрілка *I* вказує напрямок струму у котушки керування *24*; ***B*** – вектор магнітної індукції; *10* – вісь; *17* – кронштейн; *23* – ВМП; *25* – центральна вісь симетрії перерізу котушки керування *24*; *26 – 28* – контактні кільця

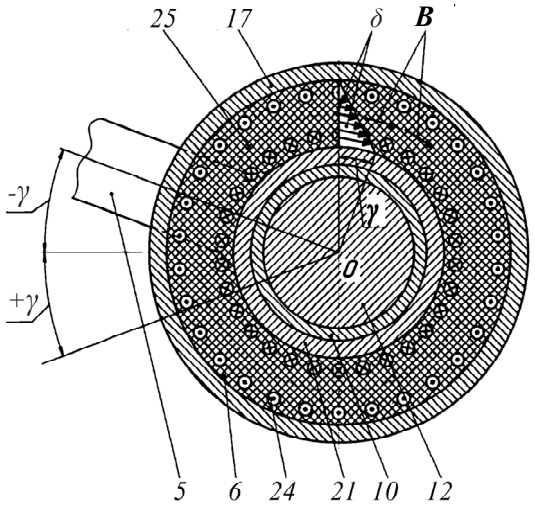


Рис. 6. Переріз *F-F* (за рис. 4): *12* – торсіонний вал при його повороті разом із нижнім важелем *5* на кут γ; δ – напрямок деформації зсуву; ***B*** – вектор магнітної індукції керуючого магнітного поля; *5* – нижній важіль; *6* – ВМП ; *10* – вісь; *12* – торсіонний вал; *17* – кронштейн; *21* – втулка; *24* – котушка керування; *25* – центральна вісь симетрії перерізу котушки керування *24*

Виконання котушки керування *24* (рис. 4, рис. 5) з еластичного провідника струму, наприклад, із поліацетилену, модуль пружності якого наближений до модуля пружності МРЕ, виключає взаємні переміщення та тертя контактуючих поверхонь котушки керування *24* з МРЕ, що підвищить надійність роботи пристрою. При збільшенні струму у котушках керування *24* їх магнітне поле зросте, відповідно збільшаться жорсткість і демпфування ВМП *6*, що викличе невелике зростання частоти власних коливань підресореного корпусу. Ця частота відрізнятиметься від частоти слідування нерівностей дорожнього профілю (збудження), в наслідок чого амплітуди резонансних коливань підресореного корпусу зменшаться. Завдяки керуванню також зросте сила демпфування у ВМП, яка додасться до сили демпфування ГА. Це призведе до покращення плавності ходу ТЗ.

Результати досліджень. Для досягнення поставлених завдань було сформульовано гіпотезу: *оскільки відомо, що котушки у вигляді тороїдів концентрують*

електромагнітне поле в їх осердях, то можна очікувати, що тороподібний ВМП підвищить індукцію керуючого магнітного поля, забезпечить рівномірний її розподіл за об'ємом та виключить «магнітні містки».

Вихідними даними для досліджень були креслення ВМП (рис. 6), магнітні характеристики сталі шарніру і наповнювача МРЕ, струм і кількість витків котушки керування та її геометричні параметри:

- середній діаметр варіювався в межах 70 – 100 мм;
- діаметр радіального перерізу 15 мм;
- діаметр концентричного отвору 8 мм;
- матеріал матриці – силіконова гума;
- розмір часток наповнювача 5 – 10 мкм;
- вміст наповнювача за об'ємом 40 %;
- матеріал наповнювача – карбонільне залізо;
- відносна магнітна проникність ВМП варіювалася в межах 6 – 8,9.

Час роботи ВМП (час подачі струму до котушки керування) був прийнятий 10 с, що допомогло запобігти їх перегріву. Даний час обґрунтовано наступним. Відомо, що за статистикою важкий з точки зору плавності ходу дорожній профіль зустрічається на місцевості лише періодично, і має 4 – 6 вершин та впадин на ділянці протяжністю 30 – 50 м. При наїзді вже на третю нерівність часто спостерігається пробій підвіски та суттєве перевищення допустимих за ергономічними нормами вертикальних пришвидшень. У результаті водій ТЗ вимушений різко знижувати швидкість. Щоб запобігти цьому саме і підключаються запропоновані ВМП КП (краще автоматично, наприклад, за допомогою датчика вертикальних пришвидшень підресореного корпусу) лише на час подолання важкої ділянки. На швидкості 8 – 11 м/с це буде складати близько 5 – 7 с. Отже, час роботи ВМП з невеликим запасом можна прийняти за 10 с. Це допоможе зберегти необхідну плавність ходу без зниження швидкості руху. У разі виходу ВМП з ладу ТЗ залишиться зі штатною підвіскою, що забезпечить його надійність.

Кінцево-елементна сітка створювалася програмним пакетом FEMM у автоматичному режимі з можливістю її коригування для уточнення результатів досліджень. З використанням програми SOLIDWORKS® складено розрахункову схему та постанову задачі розрахунку магнітного поля ВМП (рис. 7). Після завдання параметрів, конструктивних матеріалів, а також формування обмотки котушки керування, програма FEMM візуалізувала магнітне поле у вигляді силових ліній. Приклади результатів розрахунків наведено на рис. 7, 8.

Розрахунок магнітного поля проведено на перерізі твірного кола тороїда, який обумовлює конструкцію ВМП. Прийнято припущення, що частина кола обертання тороїду за товщиною розрахункової області, є прямою. Таким чином, розрахункова область стає циліндричною за формою, радіус якої обумовлено радіусом твірного кола тороїду. З урахуванням припущення, магнітне поле тороїду можливо визначити при аксіально симетричній постановці задачі. Вісь симетрії буде дотичною до кола обертання тороїду.

Граничні умови: за границею *A* векторний магнітний потенціал дорівнює нулю, за границями *B* та *C* прийнято періодичні граничні умови. У розрахунковій області *1* – матеріал ВМП, *2* – поліацетилен, що є обмоткою з керуючим струмом, *3* –сталь.

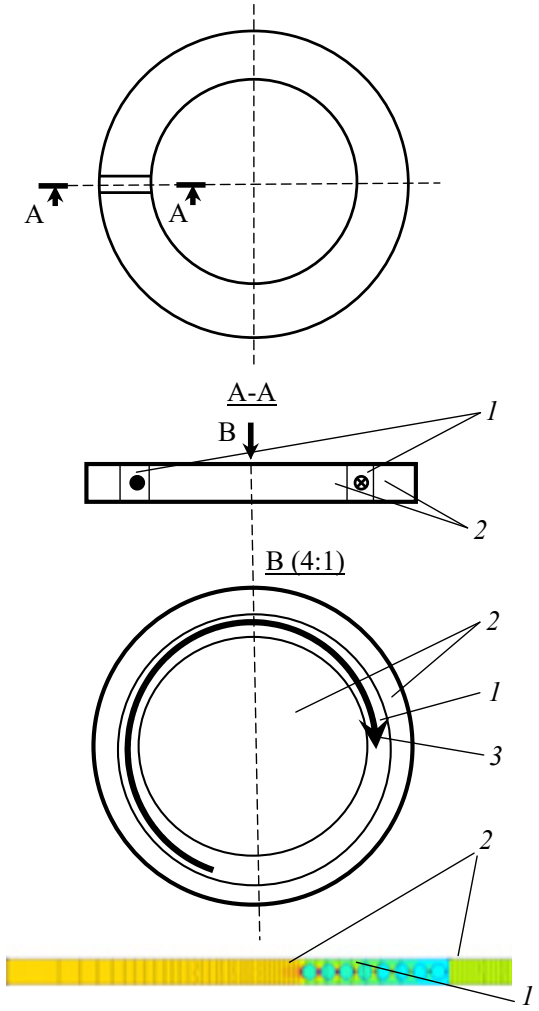


Рис. 7. До постановки задачі розрахунку магнітного поля: *1* – область зі струмом; *2* – ВМП; *3* – струм

На рис. 8 наведено розрахункову область ВМП. Дослідження виявило, що при струмі в обмотці 7,18 А, МРС F = 17232 А, щільності струму J = 42 А/мм^2, розподіл магнітної індукції у ВМП близький до рівномірного – в середньому 0,85 Тл, тобто найбільша серед інших варіантів конструкцій. Зони, де індукція не перевищує 0,1 Тл, (що у 2,5 менше за її середню величину), та «магнітні містки» (де індукція більша за 1 Тл і частки наповнювача досягли магнітного насичення) – відсутні. Густина струму на контактах (рис. 5 поз. *26 – 28*) невисока і складає 2,4 А/мм^2, тому що площа контакту значно більша за площу перерізу обмотки. Котушка ВМП живиться струмом в імпульсному режимі з ефективним охолодженням – роль радіатору виконує поверхня вузлів ходової частини ТЗ, що обдувається повітрям. Розрахунки перегріву ВМП довели, що його температура за цикл роботи не перевищує 45 – 47 °С.

Результати дослідження шляхом комп'ютерного моделювання залежності середньої індукції керуючого магнітного поля від середнього діаметру та відносної магнітної проникності удосконаленого ВМП наведено на рис. 9.

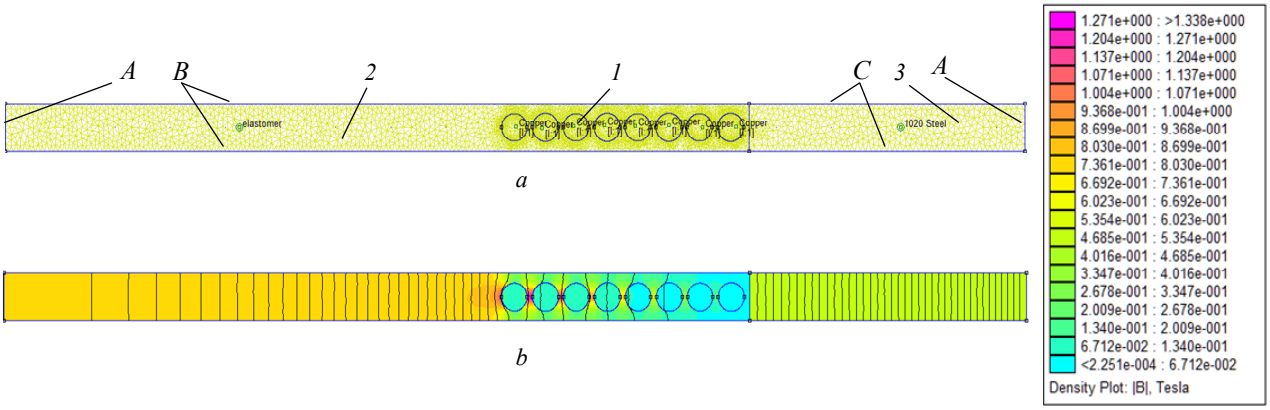


Рис. 8. Постановка (*a*) та результати вирішення (*b*) задачі розрахунку магнітного поля ВМП

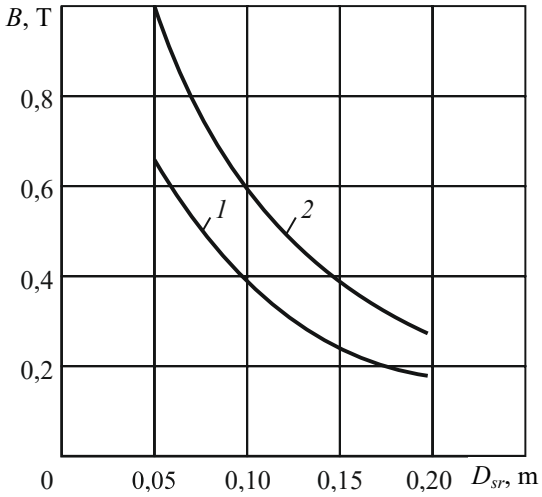


Рис. 9. Залежність середньої індукції керуючого магнітного поля від середнього діаметру ВМП та його відносної магнітної проникності: *1* – μ = 6; *2* – μ = 8,9

Як видно з рис. 9, зменшення середнього діаметру тороїда ВМП сприяє підвищенню індукції керуючого магнітного поля, а збільшення – навпаки, дещо зменшує його. Збільшення відносної магнітної проникності доцільно, тому що це пропорційно збільшує індукцію керуючого магнітного поля ВМП.

При наближенні наповнювача ВМП до стану магнітного насичення відносна магнітна проникність починає зменшуватися, що, відповідно, впливає на індукцію керуючого магнітного поля та на демпфуючі властивості ВМП. Тому на величини МРС та керуючого електричного струму накладено відповідні обмеження.

Для оцінки демпфуючих властивостей удосконаленого ВМП у вигляді тороїда використано результати досліджень, що викладені у [18], де було експериментально досліджено зразки завтовшки 10 мм із анізотропного МРЕ, який містить 40 % (за об'ємом) наповнювача (карбонільного заліза). Напрямок конгломератів у МРЕ співпадав із напрямком деформацій зразків та вектором керуючого магнітного поля. Оскільки це співпадає з особливостями удосконаленого ВМП, то можна припустити, що їх демпфуючі властивості будуть достатньо наближені між собою.

З урахуванням цього, складено залежності показника демпфування від індукції керуючого магнітного поля для близьких до лінійних частин кривих намагнічування МРЕ, коли частинки наповнювача ще не досягли магнітного насичення:

$$D = 0{,}038 + 0{,}075B. \quad (2)$$

Отже, при збільшенні індукції керуючого магнітного поля до 0,6 Тл відносний показник демпфування зростає за лінійним законом від 0,038 до 0,083, тобто у 2,2 рази. При цьому амплітуди коливань маси на зразках із МРЕ зменшувалися удвічі [18].

З використанням залежності (2) розраховано відносний показник демпфування ВМП D_V у вигляді тора при індукції керуючого магнітного поля B = 0,85 Тл, що була у ньому досягнута (рис. 7, 8):

$$D_V = 0{,}102; \quad (3)$$

$$\Delta D_V = 0{,}102 / 0{,}038 = 2{,}68. \quad (4)$$

Таким чином, показник демпфування зріс у 2,68 рази у порівнянні з випадком, коли керуюче магнітне поле відсутнє. Це на 22 % більше, ніж було досягнуто у попередніх конструкціях ВМП (рис. 1, 2).

Оцінювання ефективності удосконаленого ВМП у вигляді тора проведено шляхом порівняння за відносним показником демпфування та за силою не пружного опору ((Н/(м/с) або кг/с) двох ТЗ. Перший з них обладнано підвіскою, що містить пружні шарніри із гуми, а другий – пружні шарніри з ВМП у вигляді тора.

На демпфуючі властивості гуми магнітне поле не впливає, тому її відносний показник демпфування D_r, який отримано при стендових випробуваннях, є постійним і дорівнює

$$D_r = 0{,}035. \quad (5)$$

Експериментально отримана сила не пружного опору ГА штатної підвіски одного з ТЗ дорівнює:

$$\beta_a = 4000 \text{ кг/с}. \quad (6)$$

Для визначення сили не пружного опору підвіски з ВМП використаємо відому залежність для критичного коефіцієнту опору β_k коливальної системи [кг/с]:

$$\beta_k = 2\cdot(C\cdot m)^{0,5}, \quad (7)$$

де m – маса, що бере участь у коливаннях; C – жорсткість підвіски.

При масі m = 2000 кг частини корпусу, яка припадає на одне колесо ТЗ, та жорсткості пружної підвіски C = 117800 Н/м, критична сила не пружного опору підвіски з удосконаленим ВМП β_{kv} складе

$$\beta_{kv} = 2\cdot(117800\cdot 2000)^{0,5} = 30699 \text{ кг/с}. \quad (8)$$

Сила не пружного опору підвіски ТЗ з ВМП без ГА β_v

$$\beta_v = 0{,}102\cdot 30699 = 3099 \text{ кг/с}. \quad (9)$$

Сила не пружного опору підвіски ТЗ з ГА та пружними шарнірами важелів із ВМП β_{av}

$$\beta_{av} = 4000 + 3099 = 7099 \text{ кг/с}. \quad (10)$$

Сила не пружного опору підвіски ТЗ з гумовими шарнірами без ГА β_r

$$\beta_r = 0{,}035 \cdot 30699 = 1074 \text{ кг/с}. \quad (11)$$

Сила не пружного опору підвіски ТЗ з ГА та пружними шарнірами важелів із гуми β_{ar}

$$\beta_{ar} = 4000 + 1074 = 5074 \text{ кг/с}. \quad (12)$$

Відносний показник демпфування коливань підвіски ТЗ з ГА та пружними шарнірами важелів із гуми складає

$$D_{ar} = (\beta_a + \beta_r) / \beta_k; \quad (13)$$

$$D_{ar} = (4000 + 1074) / 30699 = 0{,}165. \quad (14)$$

Відносний показник демпфування коливань підвіски ТЗ з ГА та пружними шарнірами важелів із удосконаленим ВМП складає

$$D_{ar} = (\beta_a + \beta_v) / \beta_k; \quad (15)$$

$$D_{ar} = (4000 + 3099) / 30699 = 0{,}231. \quad (16)$$

Вочевидь, завдяки збільшенню у 7099/5074 = 1,4 рази сили не пружного опору підвіски при обладнанні її удосконаленим ВМП суттєво поліпшуються демпфуючі якості і плавність ходу ТЗ.

Для оцінки ефективності керування демпфуванням підвіски ТЗ на рис. 10 наведено залежності відносного показника демпфування коливань від індукції керуючого магнітного поля для варіантів конструкцій ВМП та штатної підвіски колісного ТЗ.

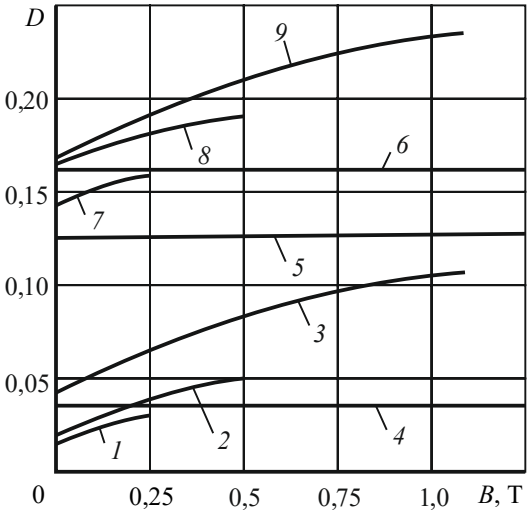


Рис. 10. Залежності відносного показника демпфування коливань підвіски від індукції керуючого магнітного поля ВМП. *Експериментальні*: *1* – перший та другий варіанти ВМП; *2* – третій варіант ВМП; *3* – удосконалений ВМП; *4* – гумові пружні шарніри; *5* – ГА; *6* – штатна підвіска з ГА та гумовими пружними шарнірами. *Розрахункові*: підвіска з ГА та пружними шарнірами: *7* – за першим та другим варіантами ВМП; *8* – за третім варіантом ВМП; 9 – з удосконаленим ВМП

Графіки на рис. 10 дозволяють провести порівняння ефективності рядку підвісок ТЗ. Графік *1* доводить, що ВМП за першим та другим варіантами конструкцій, має відносний показник демпфування коливань не більше за 0,03. При встановленні його до підвіски разом із штатним ГА (*5*) реалізується відносний показник демпфування коливань не більший за 0,16, (*7*), тобто на мінімальному рівні рекомендованого (0,15 – 0,25) для ТЗ. Причини цього пов'язані із наявністю у ВМП об'єму з надто малою індукцією керуючого магнітного поля, «магнітними містками» на торцевих частинах магнітного кола пружного шарніру та відсутністю колінеарності вектору індукції керуючого магнітного поля з напрямками конгломератів наповнювача і деформацій ВМП.

Графік *2* доводить, що ВМП за третім варіантом конструкції, має відносний показник демпфування коливань 0,05. При встановленні його до підвіски разом із штатним ГА (*5*) реалізується відносний показник демпфування коливань 0,18 (*8*), тобто на мінімальному рівні. Причиною цього є поява «магнітних містків» та відсутність колінеарності вектору індукції керуючого магнітного поля з напрямками деформацій та конгломератів наповнювача.

Графік *4* доводить, що штатні гумові пружні шарніри відтворюють відносний показник демпфування коливань на рівні 0,035. При встановленні їх до підвіски разом із штатним ГА (*5*) реалізується відносний показник демпфування коливань (*6*) на рівні 0,165, тобто майже мінімальний рекомендований. Це підтверджено експериментальними дослідженнями руху ТЗ по дорогам з важким профілем, в процесі яких виявлено, що на таких дорогах демпфування не вистачає, а штатні ГА перегріваються [1].

Графік *3* доводить, що обладнання підвіски ТЗ удосконаленим варіантом конструкції ВМП відтворює відносний показник демпфування коливань на рівні 0,102. При встановленні ВМП до підвіски разом із штатним ГА (*5*) реалізується відносний показник демпфування коливань 0,231 (*9*), що наближено до його максимально рекомендованого значення (0,25). Причина цього полягає в наступному: забезпечено колінеарність вектору індукції керуючого магнітного поля з напрямками деформацій та конгломератів наповнювача ВМП, керуюче магнітне поле концентровано лише у тороїді та рівномірно розподілено в його об'ємі, а «магнітні містки» відсутні.

Збільшення при керуванні підвіскою відносного показника демпфування коливань від 0,165 до 0,231 (тобто у 1,4 рази), має суттєво поліпшити плавність ходу ТЗ.

Висновки.

1. Аналіз джерел виявив, що магніореологічні еластоміри мають певні перспективи щодо використання у технічних пристроях. Відомим конструкціям виконавчих магніореологічних пристроїв (ВМП) керованих підвісок (КП) транспортних засобів (ТЗ) притаманні недоліки: неможливо досягти необхідної за значенням індукції керуючого магнітного поля, спрямувати її уздовж конгломератів феромагнітного наповнювача та деформацій, і наявність зон, де вона занадто мала, що знижує ефективність керування КП.

2. Удосконалено та запатентовано конструкцію ВМП, що позбавлений згаданих недоліків, який виконано у вигляді тороїдів з котушками керування із струмопровідного пружного полімеру.

3. Виявлено, що середнє значення індукції керуючого магнітного поля удосконаленого ВМП досягає 0,85 Тл (тобто межі, де феромагнітний наповнювач тільки починає магнітно насичуватися, а графік намагнічування близький до лінійного, і його відносна магнітна проникність найбільша і майже постійна), а зони, де індукція занадто мала – відсутні.

4. Складено залежність показника демпфування зразків із МРЕ від індукції керуючого магнітного поля, яка дозволяє на стадії проєктування КП прогнозувати її демпфуючі якості.

5. Порівняно ефективність підвісок з удосконаленим ВМП та із штатною підвіскою, що містить пружні шарніри із гуми, за відносним показником демпфування. Відносний показник демпфування коливань підвіски ТЗ з штатним гідравлічним амортизатором та пружними шарнірами важелів із удосконаленим ВМП при найбільшому струмі керування складає 0,231, що у 1,4 рази більше, ніж у штатної підвіски, що позитивно вплине на плавність ходу ТЗ.

6. Напрямки подальших досліджень полягають у оптимізації параметрів котушок керування для забезпечення їх захисту від перегріву.

Конфлікт інтересів. Автори статті декларують відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дущенко В.В., Маслієв А.О. Використання інтелектуальних матеріалів у вузлах систем підресорювання перспективних військових гусеничних і колісних машин. *Військово-технічний збірник*, 2016, № 14, С. 7-13. doi: https://doi.org/10.33577/2312-4458.14.2016.7-13.

2. Zou Z., Zhang H., Liao C., Wang N., Choi S.-B. Hydrodynamic behaviors of settled magnetorheological fluid redispersion under active dispersing mechanism: simulation and experiment. Smart Materials and *Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 097001. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac86b0.

3. Deng L., Sun S., Jin S., Li Z., Du H., Zhang S., Li W. Development of a new magnetorheological impact damper with low velocity sensitivity. *Smart Materials and Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 095042. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac864d.

4. Zhang J., Qiao Y., Zhang M., Zhai P. Magnetorheological behavior of isotropic silicone rubber-based magnetorheological elastomers under coupled static–dynamic compressive loads. *Smart Materials and Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 095010. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7d24.

5. Erenchun A., Prieto B., Artetxe G., Gil-Negrete N. Practical design of an electromagnet for the compression characterization of magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 095005. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7bbe.

6. Ahamed R., Choi S.-B., Ferdaus M.M. A state of art on magnetorheological materials and their potential applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, vol. 29, no. 10, pp. 2051-2095. doi: https://doi.org/10.1177/1045389X18754350.

7. Bastola A.K., Paudel M., Li L. Magnetic circuit analysis to obtain the magnetic permeability of magnetorheological elastomers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, vol. 29, no. 14, pp. 2946-2953. doi: https://doi.org/10.1177/1045389X18781046.

8. Behrooz M., Wang X., Gordaninejad F. Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system. *Smart Materials and Structures*, 2014, vol. 23, no. 4, art. no. 045014. doi: https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/4/045014.

9. Dargahi A., Sedaghati R., Rakheja S. On the properties of magnetorheological elastomers in shear mode: Design, fabrication and characterization. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 159, pp. 269-283. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.080.

10. 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: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.048.

11. Agirre-Olabide I., Kuzhir P., Elejabarrieta M.J. Linear magneto-viscoelastic model based on magnetic permeability components for anisotropic magnetorheological elastomers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 446, pp. 155-161. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.09.017.

12. Васько В.М., Гребенюк С.Н., Решевская Е.С. Определение напряженно-деформированного состояния эластомерного виброизолятора. *Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки*, 2015, № 3, С. 36-41.

13. Wang Q., Dong X., Li L., Ou J. Study on an improved variable stiffness tuned mass damper based on conical magnetorheological elastomer isolators. *Smart Materials and Structures*, 2017, vol. 26, no. 10, art. no. 105028. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa81e8.

14. Erenchun A., Prieto B., Artetxe G., Gil-Negrete N. Practical design of an electromagnet for the compression characterization of magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 095005. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7bbe.

15. Kawasetsu T., Horii T., Ishihara H., Asada M. Flexible Tri-Axis Tactile Sensor Using Spiral Inductor and Magnetorheological Elastomer. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 14, pp. 5834-5841. doi: https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2844194.

16. Qi S., Guo H., Chen J., Fu J., Hu C., Yu M., Wang Z.L. Magnetorheological elastomers enabled high-sensitive self-powered tribo-sensor for magnetic field detection. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, no. 10, pp. 4745-4752. doi: https://doi.org/10.1039/C7NR09129J.

17. Sun S., Yang J., Yildirim T., Du H., Alici G., Zhang S., Li W. Development of a nonlinear adaptive absorber based on magnetorheological elastomer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, vol. 29, no. 2, pp. 194-204. doi: https://doi.org/10.1177/1045389X17733053.

18. Dushchenko V.V., Masliev V.G., Nanivskyi R.A., Masliev A.O. Application of magnetorheological elastomers for performance control of cushioning systems for wheeled vehicles. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 50-59. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.09.

19. Дущенко В.В., Маслієв А.О. Патент 110476UA. *Підвіска з регулюванням жорсткості та демпфування*. 2016, Бюл. №. 19.

20. Дущенко В.В., Маслієв А.О., Маслієв В.Г. Патент 149223UA. *Регульована підвіска транспортного засобу*. 2021. Бюл. №. 43.

REFERENCES

1. Dushchenko V.V., Masliev A.O. Use of materials intelligent systems at the nodes cushioning prospective military tracked and wheeled vehicles. *Military Technical Collection*, 2016, no. 14, pp. 7-13. (Ukr). doi: https://doi.org/10.33577/2312-4458.14.2016.7-13.

2. Zou Z., Zhang H., Liao C., Wang N., Choi S.-B. Hydrodynamic behaviors of settled magnetorheological fluid redispersion under active dispersing mechanism: simulation and experiment. Smart Materials and *Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 097001. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac86b0.

3. Deng L., Sun S., Jin S., Li Z., Du H., Zhang S., Li W. Development of a new magnetorheological impact damper with low velocity sensitivity. *Smart Materials and Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 095042. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac864d.

4. Zhang J., Qiao Y., Zhang M., Zhai P. Magnetorheological behavior of isotropic silicone rubber-based magnetorheological elastomers under coupled static–dynamic compressive loads. *Smart Materials and Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 095010. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7d24.

5. Erenchun A., Prieto B., Artetxe G., Gil-Negrete N. Practical design of an electromagnet for the compression characterization of magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 095005. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7bbe.

6. Ahamed R., Choi S.-B., Ferdaus M.M. A state of art on magnetorheological materials and their potential applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, vol. 29, no. 10, pp. 2051-2095. doi: https://doi.org/10.1177/1045389X18754350.

7. Bastola A.K., Paudel M., Li L. Magnetic circuit analysis to obtain the magnetic permeability of magnetorheological elastomers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, vol. 29, no. 14, pp. 2946-2953. doi: https://doi.org/10.1177/1045389X18781046.

8. Behrooz M., Wang X., Gordaninejad F. Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system. *Smart Materials and Structures*, 2014, vol. 23, no. 4, art. no. 045014. doi: https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/4/045014.

9. Dargahi A., Sedaghati R., Rakheja S. On the properties of magnetorheological elastomers in shear mode: Design, fabrication and characterization. *Composites Part B: Engineering*, 2019, vol. 159, pp. 269-283. doi: https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.080.

10. 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: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.11.048.

11. Agirre-Olabide I., Kuzhir P., Elejabarrieta M.J. Linear magneto-viscoelastic model based on magnetic permeability components for anisotropic magnetorheological elastomers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, vol. 446, pp. 155-161. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.09.017.

12. Vasco V.M., Grebenuyk S.M., Reshevskaya E.S. A determination of stress-strain state of elastomeric isolator. *Bulletin of Zaporizhzhia National University. Physical & Mathematical Sciences*, 2015, no. 3, pp. 36-41. (Rus).
13. Wang Q., Dong X., Li L., Ou J. Study on an improved variable stiffness tuned mass damper based on conical magnetorheological elastomer isolators. *Smart Materials and Structures*, 2017, vol. 26, no. 10, art. no. 105028. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa81e8.
14. Erenchun A., Prieto B., Artetxe G., Gil-Negrete N. Practical design of an electromagnet for the compression characterization of magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures*, 2022, vol. 31, no. 9, art. no. 095005. doi: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac7bbe.
15. Kawasetsu T., Horii T., Ishihara H., Asada M. Flexible Tri-Axis Tactile Sensor Using Spiral Inductor and Magnetorheological Elastomer. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 14, pp. 5834-5841. doi: https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2844194.
16. Qi S., Guo H., Chen J., Fu J., Hu C., Yu M., Wang Z.L. Magnetorheological elastomers enabled high-sensitive self-powered tribo-sensor for magnetic field detection. *Nanoscale*, 2018, vol. 10, no. 10, pp. 4745-4752. doi: https://doi.org/10.1039/C7NR09129J.
17. Sun S., Yang J., Yildirim T., Du H., Alici G., Zhang S., Li W. Development of a nonlinear adaptive absorber based on magnetorheological elastomer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, vol. 29, no. 2, pp. 194-204. doi: https://doi.org/10.1177/1045389X17733053.
18. Dushchenko V.V., Masliev V.G., Nanivskyi R.A., Masliev A.O. Application of magnetorheological elastomers for performance control of cushioning systems for wheeled vehicles. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2019, no. 5, pp. 50-59. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2019.5.09.
19. Dushchenko V., Masliiev A. *Suspension with adjustable stiffness and damping*. Patent UA, no. 110476. 2016. (Ukr).
20. Dushchenko V., Masliiev A., Masliiev V. *Adjustable vehicle suspension*. Patent UA, no. 149223. 2021. (Ukr).

Надійшла (Received) 22.09.2023
Прийнята (Accepted) 17.03.2024
Опублікована (Published) 20.08.2024

Дущенко Владислав Васильович[1], *д.т.н., проф.*,
Любарський Борис Григорович[1], *д.т.н., проф.*,
Масліев Антон Олегович[2], *доктор філософії*,
Нанівський Роман Антонович[3], *к.т.н., доц.*,
Масліев Вячеслав Георгійович[1], *д.т.н., проф.*,
Агапов Олег Миколайович[1], *к.т.н., доц.*,
Якунін Дмитро Ігорович[1], *к.т.н., доц.*,
[1] Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
e-mail: viacheslav.masliiev@khpi.edu.ua (Corresponding Author)
[2] Збройні Сили України
[3] Національна академія сухопутних військ
імені гетьмана Петра Сагайдачного,
79026, Львів, вул. Героїв Майдану, 32.

V.V. Dushchenko[1], *B.G. Liubarskyi*[1], *A.O. Masliev*[2],
R.A. Nanivskyi[3], *V.G. Masliev*[1], *O.M. Ahapov*[1], *D.I. Iakunin*[1]
[1] National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.
[2] Armed Forces of Ukraine.
[3] Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy,
32, Heroes of Maidan Str., Lviv, 79026, Ukraine.

Increasing the damping properties of the magnetorheological actuator of the vehicle suspension control system.

Introduction. *In accordance with one of the ways of solving the problem of increasing the smoothness of the vehicles, a controlled suspension is proposed, which is created on the basis of the use of «smart» materials – magnetorheological elastomers, the mechanical properties of which, in particular, damping, can be changed with the help of a controlling magnetic field. This is implemented with the help of the magnetorheological actuator of the suspension control system, which has the form of an elastic bushing of the suspension arm, consisting of several electrically connected in series toroid-like coils (with a core of magnetorheological elastomer). The device is powered by current, the value of which is controlled by the operator, or automatically, depending on the road profile and driving mode. Magnetorheological actuators (elastic bushings) are placed in the holes of the suspension levers instead of standard rubber ones and combined with a controlled current source. Thus, the suspension becomes controllable, which makes it possible to set the necessary vibration damping of the vehicle body to increase its smoothness.* ***Problem****. The disadvantage of the previous designs of the magnetorheological actuator is the insufficient amount of the magnetic flux density and the unevenness of its distribution within the elastic bushings. As a result, the damping properties of such controlled suspensions become insufficiently effective, which reduces the possibility of increasing the smoothness of the vehicles.* ***The purpose*** *of the work is to increase the damping properties of the magnetorheological actuator of the vehicle suspension control system, which will increase the control efficiency.* ***The task*** *is to improve the design of the performing magnetorheological device, to carry out calculations and develop a calculation scheme of the study, to determine the average magnetic flux density value and its distribution across the cross-section of the device, to calculate the dependence of the device damping indicator on the magnetic flux density, to compare the damping indicators of the improved device with previously known ones.* ***Methodology.*** *Research tasks were solved on the basis of magnetic field analysis using methods of magnetic field theory and SOLIDWORKS® and FEMM software packages, as well as analysis of the dependence of the damping properties of bushings from magnetorheological elastomers on magnetic flux density. A description of the design and principle of operation of the magnetorheological actuator of the vehicle suspension characteristics control system is given, based on which the calculation scheme was developed.* ***Results.*** *The results of research calculations showed that the average value of magnetic flux density in the proposed design of the device reached 0.85 T, its distribution became fairly uniform, and there were no zones where it was abnormally small. For the first time, the dependence of the damping index on the magnetic flux density of the controlling magnetic field has signs of scientific novelty. It was found that this indicator for the proposed design of the device increased by 22 % compared to previous other designs, which will increase the efficiency of the control system and the smoothness of the vehicle. A positive result was achieved due to the following features of the proposed design of the suspension actuator: the elastic sleeve consists of several coaxially located actuators made of anisotropic magnetorheological elastomer, in which the conglomerates of the ferromagnetic filler during the manufacturing process are located collinear to the direction of the angular deformations of the sleeve and the control magnetic field flux density vector, and the devices have control coils located on their surfaces, which are made of conductive elastic elastomer and electrically connected in a series circuit.* ***Originality****. The control method, previous designs and construction of this controlled suspension are protected by patents of Ukraine.* ***Practical value****. The direction of further research is to optimize the parameters of the control coils in order to reduce the energy consumption for them and to protect them from overheating.* References 20, figures 10.

Key words: **magnetic field, magnetorheological actuator, anisotropic magnetorheological elastomer, control system, vehicle suspension, damping.**

How to cite this article:
Dushchenko V.V., Liubarskyi B.G., Masliev A.O., Nanivskyi R.A., Masliev V.G., Ahapov O.M., Iakunin D.I. Increasing the damping properties of the magnetorheological actuator of the vehicle suspension control system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 5, pp. 77-86. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.5.11