

УДК 620.172.21:541.6

*В. В. ДУЩЕНКО, А. О. МАСЛІЄВ***СТЕНД ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ ТА МОДУЛЬ ВТРАТ МАГНІТОРЕОЛОГІЧНИХ ЕЛАСТОМЕРІВ**

Розглянуто питання створення стенду для широкого спектру досліджень впливу магнітного поля на модуль пружності і модуль втрат зразків пружних втулок з магнитоологічних еластомерів підвіски транспортних засобів при деформаціях розтягування-стискання та зсуву. Вирішені питання підвищення точності вимірювань характеристик магнитоологічних еластомерів у порівнянні з відомими аналогами. При розробці стенду передбачено виключення впливу сторонніх факторів, зокрема таких, як сила тяжіння та втрати магнітного потоку. Із зразків, які досліджуються та ферромагнітних матеріалів створено магнітний ланцюг без повітряних зазорів, що забезпечило необхідну величину індукції магнітного поля. Розроблено вимірювальний комплекс для реєстрації сил та деформацій зразків із використанням тензометрії та сучасних мікропроцесорних технологій.

**Ключові слова:** стенд, магнітне поле, магнитоологічний еластомер, модуль пружності, модуль втрат, жорсткість, демпфірування, магнітна індукція, деформація, вимірювальний комплекс.

*В.В. ДУЩЕНКО, А.О. МАСЛИЕВ***СТЕНД ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МОДУЛЬ УПРУГОСТИ И МОДУЛЬ ПОТЕРЬ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ**

Рассмотрен вопрос создания стенда для широкого спектра исследований влияния магнитного поля на модуль упругости и модуль потерь образцов упругих втулок из магнитоологических эластомеров подвески транспортных средств при деформациях растяжения-сжатия и сдвига. Решены вопросы повышения точности измерений характеристик магнитоологических эластомеров по сравнению с известными аналогами. При разработке стенда предусмотрено исключение влияния посторонних факторов, таких, как сила тяжести и потери магнитного потока. Из образцов, которые исследуются и ферромагнитных материалов создана магнитная цепь без воздушных зазоров, что обеспечило необходимую величину индукции магнитного поля. Разработан измерительный комплекс для регистрации сил и деформаций образцов с использованием тензометрии и современных микропроцессорных технологий.

**Ключевые слова:** стенд, магнитное поле, магнитоологический эластомер, модуль упругости, модуль потерь, жесткость, демпфирование, магнитная индукция, деформация, измерительный комплекс.

*V.V. DUSCHENKO, A.O. MASLIEV***STAND FOR EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON THE ELASTIC MODULUS AND A MODULE OF LOSSES OF MAGNETORHEOLOGICAL ELASTOMERS**

The issue of creating a stand for a wide range of investigations of the influence of a magnetic field on the elastic modulus and a module of loss of samples of elastic magnetorheological elastomers bushings of a suspension of vehicles under strain-compression and shear are considered. The questions of increasing the accuracy of measurements of the characteristics of magnetorheological elastomers in comparison with known analogues have been solved. When designing the stand, it is foreseen to exclude the influence of external factors, such as gravity and loss of magnetic flux. From the specimens being studied and the ferromagnetic materials, a magnetic circuit was created without air gaps, which provided the required magnitude of the magnetic field induction. The measuring complex for registration of forces and strains of samples using strain gauge and modern microprocessor technologies was developed.

**Key words:** stand, magnetic field, magnetorheological elastomer, elastic modulus, loss module, stiffness, damping, magnetic induction, deformation, measuring complex.

**Вступ.** На сьогоднішній день актуальною проблемою є впровадження керування характеристиками підвіски транспортних засобів (ТЗ) з метою підвищення показників їх рухливості [1]. Одним з напрямків вирішення даної проблеми є застосування альтернативних матеріалів та нетрадиційних технічних рішень вузлів підвіски, а саме «інтелектуальних» матеріалів - магнитоологічних еластомерів (МРЕ), характеристики жорсткості та демпфірування яких можна змінювати за допомогою керуючого магнітного поля [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [3, 4] описано схеми стендів для дослідження впливу магнітного поля на характеристики МРЕ. Зокрема, комплекс для досліджень впливу магнітного

поля на жорсткість зразків із МРЕ, містить випробувальну машину FS-100 СТ, блок живлення постійним струмом, електромагніт із зазором, у якому розміщують зразок із МРЕ, що досліджується, вимірювач сили та систему для реєстрації. Він дозволяє проводити дослідження деформацій розтягування зразків із МРЕ при дії магнітного поля з індукцією до 1,2 Тл, вектор якої спрямований тільки у поперек до напрямку деформації.

У іншій пристрої для дослідження впливу зовнішнього магнітного поля зокрема на модуль пружності зразків, який містить постійні магніти, зразок із МРЕ розташовано на підставці між магнітами та навантажено зверху силою ваги певної маси. Пристрій дозволяє досліджувати характеристики жорсткості та втрати енергії через

© В. В. Дущенко, А. О. Маслієв, 2018

внутрішнє тертя у зразків із МРЕ при статичних деформаціях стискання і дії магнітного поля, вектор індукції якого спрямовано у поперек до напрямку деформації.

Також відомо пристрій для дослідження вимушених коливань на основі деформацій зсуву зразків із МРЕ при наявності зовнішнього магнітного поля, який містить генератор механічних коливань із штоком, що поєднує його із розташованими між полюсами електромагніта зразками із МРЕ, датчик зміщення штоку та персональний комп'ютер. Він дає можливість досліджувати характеристики жорсткості та втрати енергії через внутрішнє тертя у зразків із МРЕ при деформаціях зсуву як у статичному режимі, так і у режимі вимушених коливань при різних частотах та при дії магнітного поля, вектор індукції якого спрямовано у поперек до напрямку деформації.

Найбільш досконалою є установка для дослідження вимушених коливань на основі деформації розтягування-стискання зразків із МРЕ, яка містить лінійку, що закріплена до рами стенду, розташовані на ній два постійних магніти, один з яких взаємодіє із електромагнітом, що збуджує коливання лінійки, а другий взаємодіє із датчиком Холла, для вимірювання амплітуд та частот коливань лінійки. На протилежній частині лінійки закріплено два зразки із МРЕ, які розташовано між полюсами електромагніту, що створює постійне магнітне поле. Робота системи керується за допомогою спеціальної програми персональним комп'ютером. Вона дозволяє досліджувати характеристики жорсткості та втрати енергії через внутрішнє тертя у зразках із МРЕ при деформаціях розтягування-стискання як у статичному режимі, так і у режимі вимушених коливань при різних частотах та при дії магнітного поля, вектор індукції якого співпадає з напрямком деформації зразків.

Між тим, відомо, що для досягнення максимального ефекту від впливу магнітного поля на механічні властивості МРЕ, вектор індукції повинен співпадати з напрямком деформації. Відзначається, що МРЕ може називатися тільки той матеріал, який синтезований в магнітному полі. Такі матеріали досить сильно змінюють пружність в магнітному полі за умови збігу напрямків магнітних полів під час отримання та випробувань зразків. У разі ізотропного зразка або якщо напрямки поля і орієнтації магнітних частинок у зразку перпендикулярні, ефект практично не виявляється [5]. Дослідження залежності пружності від концентрації магнітних частинок для звичайного ізотропного матеріалу показують, що пружність в магнітному полі зростає, як правило, тим більше, чим більше концентрація магнітного наповнювача [6,7].

Недоліками наведених пристроїв є те, що вони унеможливають проведення широкого спектру досліджень, тобто деформацій стискання-розтягування та зсуву зразків, а також реалізацію співпадіння напрямку деформації зразка із напрямком вектору індукції магнітного поля.

Крім того, на цей час практично відсутні експериментальні дані досліджень зі зміни модуля

пружності і модуля втрат МРЕ при застосуванні у вузлах підвіски ТЗ, що унеможливує отримання вірогідних розрахункових результатів для практичного застосування.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Розробити стенд з підвищеною точністю для експериментального дослідження впливу магнітного поля на характеристики жорсткості і демпфірування втулок з МРЕ пружних шарнірів підвіски ТЗ, що дозволить перевірити вірогідність математичних моделей процесів, що досліджуються та у подальшому розробити працездатні технічні рішення вузлів з керованими характеристиками.

**Матеріали досліджень.** На рис. 1 – зображено стенд, вигляд з переду: переріз А-А, при дослідженнях деформацій стискання-розтягування зразків; на рис. 2 - зображений стенд, вигляд зверху, при дослідженнях деформацій стискання-розтягування зразків; на рис. 3 - зображений стенд, вигляд з переду: переріз Б-Б, при дослідженні деформацій зсуву зразків; на рис. 4 - зображений стенд, вигляд з боку, при дослідженнях деформацій зсуву зразків.

Стенд містить раму 1, до якої закріплено виготовлену із феромагнетику стойку 2, до якої жорстко закріплено виготовлену із немагнітного матеріалу гнучку пластину 3, яка жорстко поєднана з виготовленою із феромагнетику жорсткою пластиною 4, що закріплена за допомогою клею до виготовлених із МРЕ однакових за геометрією та вмістом наповнювача (наприклад, карбонільного заліза), пружних зразків 5, 6 які, в свою чергу, також закріплено до електромагнітів 7 та 8, що встановлені на виготовлених із феромагнетику щелепах 9 та 10, а протилежні кінці кожної із щелеп 9, 10 жорстко закріплено до стойки 2. Прогиномір 11 одним кінцем закріплено до рами 1, а його протилежний кінець спирається на бічну поверхню пластини 4, на кінці якої закріплено вантаж 12, та за допомогою тросика 13 приєднано силомір 14.

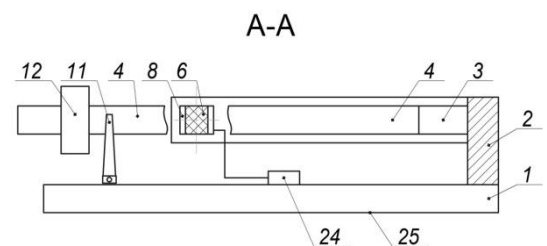


Рис. 1 – Стенд, вигляд з переду: переріз А-А, при дослідженнях деформацій стискання-розтягування зразків

До пластини 4 також закріплено пружину 15, другий кінець якої поєднано із електромеханічним вібратором 16, який живиться струмом змінної частоти через підсилювач 17 від звукової плати персонального комп'ютера 18.

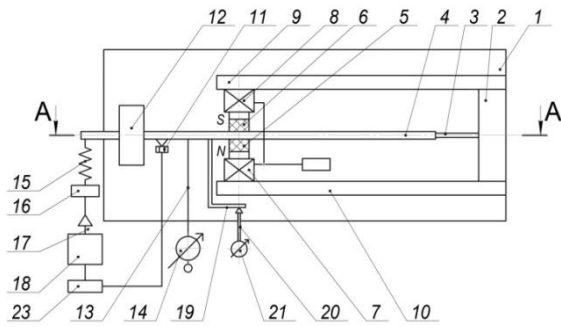


Рис. 2 – Стенд, вигляд зверху, при дослідженні деформацій стиснення-розтягування зразків

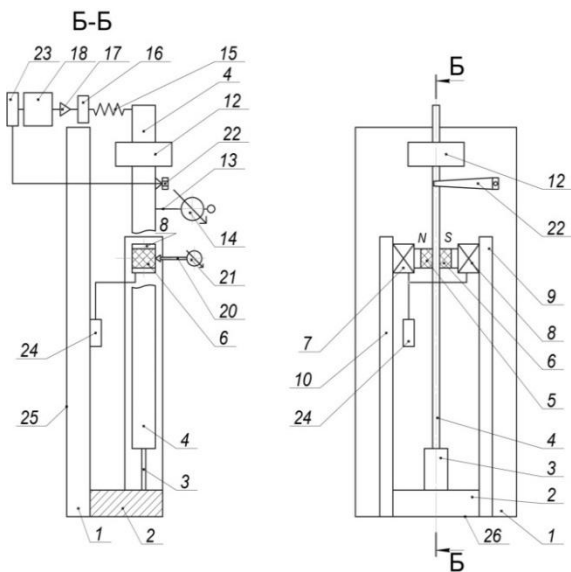


Рис. 3 – Стенд, вигляд з переду: переріз Б-Б, при дослідженні деформацій зсуву зразків

Рис. 4 – Стенд, вигляд з боку, при дослідженні деформацій зсуву зразків.

До пластини 4 також закріплено виготовлений із немагнітного матеріалу кронштейн 19, на який спирається шток 20 годинникового індикатора 21, таким чином, що вісь симетрії штока 20 співпадає із віссю симетрії зразків 5 та 6. Прогиномір 22 одним кінцем закріплено до рами 1, а другим кінцем він спирається на верхню поверхню пластини 4. Електричні сигнали від прогиномірів 11, 22 через тензопідсилювач з аналого-цифровим перетворювачем 23 надходять до персонального комп'ютера 18. Електромагніти 7, 8 отримують живлення постійним струмом від джерела 24. Рама 1 містить установчі поверхні 25 та 26.

**Результати досліджень.** Розглянемо роботу стенду при різних видах випробувань.

Статичні випробування мають за мету дослідження впливу магнітного поля на характеристики жорсткості та демпфірування зразків 5 та 6 із МРЕ.

Для досліджень деформацій стиснення-розтягування зразків 5 та 6 стенд встановлюють

площиною 25 на підлогу і за допомогою силоміра 14 через тросик 13 відтворюють з певним інтервалом зростаючий та убиваючий рядки сил  $F_{с.р.}$ , які завдяки гнучкості пластини 3, обертають пластину 4 в площині рами 1 і викликають деформацію  $X$  стиснення зразка 5 та рівною їй за модулем деформацію розтягування зразка 6. Деформацію  $X$  реєструють за допомогою годинникового індикатора 21, шток 20 якого переміщується кронштейном 19 на величину цієї деформації  $X$  завдяки співпадінню його осі із віссю симетрії зразків 5, 6. Потім змінюють напрямок дії силоміра 14 на протилежний, щоб стискався зразок 6 та розтягувався зразок 5, і повторюють виміри.

Для досліджень деформацій зсуву зразків 5, 6 стенд встановлюють на підлогу площиною 26, і за допомогою силоміра 14 відтворюють з певним інтервалом зростаючий та убиваючий рядки сил  $F_3$ , які завдяки гнучкості пластини 3, обертають пластину 4 в поперек до рами 1 і викликають деформації зсуву  $Y$  зразків 5, 6, які реєструють за допомогою годинникового індикатора 21, вісь штока якого 20 співпадає із віссю симетрії зразків 5, 6. Потім змінюють напрямок дії силоміра 14 на протилежний і повторюють виміри деформацій  $Y$  зсуву зразків 5, 6.

При проведенні обох цих досліджень до електромагнітів 7, 8 подають постійний електричний струм від джерела 24 так, щоб полюси електромагнітів 7, 8, які взаємодіють із зразками 5, 6, мали протилежну полярність. Для забезпечення достатньо високої індукції магнітного поля (не менше за 1 Тл), яка має змінювати жорсткість та демпфірування зразків 5, 6, відтворено замкнений магнітний ланцюг, який складається з виготовлених із феромагнітику: шелеп 9, 10, стійкі 2, пластини 4 та сердечників електромагнітів 7, 8. Величину струму, що живить обмотки електромагнітів 7, 8, задають з певним інтервалом.

При кожній величині струму будують графіки залежностей між силами  $F_{с.р.}$ , що реєструє силомір 14, та деформаціями стиснення-розтягування  $X$  зразків 5, 6, які реєструє годинниковий індикатор 21. На рис. 5 наведено приклад графіка для зразка МРЕ із вмістом карбонільного заліза 40% від об'єму.

Також будують графіки залежностей між силами  $F_3$  та деформаціями зсуву  $Y$ .

Для рядка точок на графіках обчислюють жорсткості на стиснення - розтягування та зсув для зразків 5, 6 - як тангенс кута нахилу дотичної до графіка у даній точці. За площинами петель гістерезису на графіках обчислюють коефіцієнт розсіювання енергії, що характеризує втрати енергії на внутрішнє тертя у матеріалі зразків 5, 6 за виразом  $\Delta = \delta \Pi / \Pi$ , і обчислюють еквівалентний коефіцієнт демпфірування  $\gamma \approx \Delta / 2 \pi$ , де позначено  $\delta \Pi$  - площа петлі гістерезису,  $\Pi$  - площина, що окреслена графіком залежності між силою та деформацією зразків 5, 6 та віссю деформацій. Ця площина дорівнює потенціальній енергії деформації зразків 5, 6.

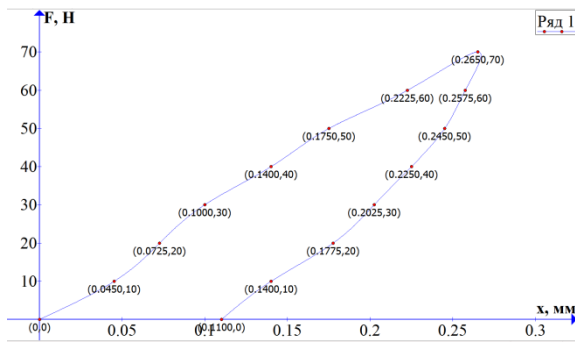


Рис. 5 – Графік залежності сили  $F_{C.P}$  від деформації стискання  $X$

Обчислюють модуль пружності МРЕ за формулою

$$E = \frac{(0,5 F_{C.P}/S)}{X/L},$$

де  $S$  – площа перерізу зразка,  $L$  – товщина зразка,  $X$  – деформація зразка.

Обчислюють модуль зсуву МРЕ за формулою

$$G = \frac{(0,5 F_3/S)}{Y/L},$$

де  $S$  – площа перерізу зразка,  $L$  – товщина зразка,  $Y$  – деформація зразка.

Вплив магнітного поля на амплітуди, частоти та демпфірування коливань маси 12 на пружних зразках 5, 6 при деформаціях стискання-розтягування, досліджують при встановленні стенда на підлогу площиною 25. Електромеханічний вібратор 16, що отримує живлення струмом змінної частоти через підсилювач 17 від персонального комп'ютера 18, через пружину 15 обертає пластину 4 в площині рами 1 завдяки гнучкості пластини 3, і викликає періодичні деформації стискання зразка 5 та водночас рівні їй за модулем періодичні деформації розтягування зразка 6, що збуджує вимушені коливання маси 12. Шляхом зміни з певним інтервалом частоти струму, отримують амплітуди деформацій  $X$  зразків 5, 6, які реєструються за допомогою прогиноміра 11 та тензопідсилювача із аналого-цифровим перетворювачем 23 – персональним комп'ютером 18.

Вплив магнітного поля на амплітуди, частоти та демпфірування коливань маси 12 на пружних зразках 5, 6 при деформаціях зсуву, досліджують при встановленні стенда на підлогу площиною 26. Електромеханічний вібратор 16, що отримує живлення струмом змінної частоти через підсилювач 17 від персонального комп'ютера 18, через пружину 15 обертає пластину 4 впоперек до площини рами 1 завдяки гнучкості пластини 3, і викликає періодичні деформації зсуву зразків 5, 6 що збуджує вимушені коливання маси 12. Шляхом зміни з певним інтервалом частоти струму, отримують амплітуди

деформацій  $Y$  зразків 5, 6, які реєструються за допомогою прогиноміра 22 та тензопідсилювача із аналого-цифровим перетворювачем 23 персональним комп'ютером 18.

При кожній частоті збудження коливань маси 12 до електромагнітів 7, 8 подають постійний струм, магнітне поле якого збільшить жорсткість та демпфірування зразків 5, 6, що викличе зменшення амплітуд коливань маси 12 та деформацій зразків 5, 6. Ступінь впливу магнітного поля на амплітуди, частоти та демпфірування коливань досліджують шляхом їх порівняння із результатами вимірювань без магнітного поля.

#### Висновки.

1. Приведено опис та принцип дії розробленого стенду для дослідження впливу керуючого магнітного поля на модуль пружності та модуль втрат зразків з МРЕ при деформаціях стискання-розтягування та деформацій зсуву. При цьому напрямок вектора індукції магнітного поля при створенні зразка із МРЕ співпадає із напрямком індукції при дослідженнях в умовах стенду, а також із напрямком деформації, що суттєво відрізняє даний стенд від відомих аналогів.

2. Забезпечено можливість підвищення точності вимірювань завдяки виконанню частини лінійки жорсткою і виключенню впливу сили тяжіння на деформації зразків із мре.

3. Утворено замкненого магнітного ланцюга, який складається з виготовлених із феромагнетиків деталей (електромагнітів, щелеп, стойки та жорсткої лінійки), що зменшує магнітний опір та сприяє підвищенню потоку магнітної індукції, який надходить до виготовлених з МРЕ зразків.

За результатами проведених досліджень було подано заявку щодо отримання Патенту України на корисну модель.

#### Список літератури

1. Е.Е Александров, Д.О. Волонцевич, В.В. Дущенко и др. Математическое моделирование процессов возмущенного движения агрегатов и систем бронетанковой техники. Харьков, НТУ «ХПИ». 2012. 354 с.
2. Алексеев А.Г., Корнев А.Е. Магнитные эластомеры. М.: Химия, 1987. 240с.
3. В.Н. Ковров, А. И. Останин, К. В. Качалин. Механические испытания магнитореологических эластомеров. «Заводская лаборатория. Диагностика материалов» № 5. 2011. Том 77, с. 56 - 59. Электронный ресурс: <https://www.zldm.ru/jour>
4. Л. В. Никитин, А. С. Семисалова, А. А. Гладков, Н. С. Перов, Е. Ю. Крамаренко. Магнитные эластомеры. Измерение модуля упругости эластомеров, его зависимости от магнитного поля. Кафедра магнетизма. Кафедра физики полимеров и кристаллов. Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова. Электронный ресурс: <https://istina.msu.ru/download/3606562/1ejQHh: h64BBgyUP7yhybCW194dZ0mqgco>
5. А.И. Горбунов, В.П. Михайлов, Г.В. Степанов и др. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2008. № 1, с.90 – 107.
6. Chen L. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers // *L. Chen, X. L. Gong, W. H. Li// Smar Material and Structures.* – 2007. – № 16. – pp. 1–6.
7. Böse H. Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties // *H. Böse, R. Rödes // 11th Conf. on*

Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions. Journal of Physics. – 2009. – Series 149. – pp. 51 - 57.

#### References (transliterated)

1. E.E. Aleksandrov, D.O. Voloncevich, V.V. Dushhenko i dr. Matematicheskoe modelirovanie processov vozmushhenogo dvizheniya agregatov i sistem bronetankovoj tehniki. Kharkov, NTU «KhPI». 2012. 354 p.
2. Alekseev A.G., Kornev A.E. Magnitnye elastomery. M.: Himiya, 1987. 240 p.
3. V.N. Kovrov, A. I. Ostanin, K. V. Kachalin. Mehanicheskie ispytaniya magnitnoreologicheskikh elastomerov. «Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov» № 5. 2011. Tom 77, pp. 56 - 59. Elektronnyj resurs: <https://www.zldm.ru/jour>
4. L. V. Nikitin, A.S. Semisalova, A.A. Gladkov, N.S. Perov, E.Yu. Kramarenko. Magnitnye elastomery. Izmerenie modulya uprugosti elastomerov, ego zavisimosti ot magnitnogo polya. Kafedra magnetizma. Kafedra fiziki polimerov i kristallov. Fizicheskij fakultet MGU im. M.V. Lomonosova. Elektronnyj resurs: <https://istina.msu.ru/download/3606562/1ejQHu:h64BBgyUP7yhybCWI94dZ0mqgco>
5. A.I. Gorbunov, V.P. Mixajlov, G.V. Stepanov i dr. Issledovanie svojstv i novoe primenenie magnitnyx silikonovyx kompozitov. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2008. № 1, pp.90 - 107.
6. Chen L. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers //L. Chen, X. L. Gong, W. H. Li// Smar Material and Structures. – 2007. – № 16. – pp. 1–6.
7. Böse H. Magnetorheological elastomers with high variability of their mechanical properties / H. Böse, R. Rödes // 11th Conf. on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions. Journal of Physics. – 2009. – Series 149. – pp. 51 - 57.

Надійшла (received) 26.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Дущенко Владислав Васильович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова», м. Харків, роб. тел. 70-76-299, моб. тел. 096-82-78-133, E-mail: [dushchenko@ukr.net](mailto:dushchenko@ukr.net)

**Маслієв Антон Олегович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Інформаційних технологій і систем колісних та гусеничних машин ім. О.О. Морозова», м. Харків, Роб. тел. 70-76-355, моб. тел. 066-073-84-17, E-mail: [tonny-posha@ukr.net](mailto:tonny-posha@ukr.net)