

В.В. Дущенко¹, С.М. Воронцов¹, Р.А. Нанівський²

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

²Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ У ГІДРОАМОРТИЗАТОРАХ ПІДВІСКИ БРОНЕТРАНСПОРТЕРА БТР-4 ТА ОЦІНКА ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ ЇЇ РЕКУПЕРАЦІЇ

Представлено дослідження втрат енергії у гідроамортизаторах (ГА) підвіски бронетранспортера БТР-4 при його русі по трьох ділянках ґрунтових доріг та пересіченій місцевості, які відповідали легким, середньої важкості та важким дорожнім умовам. Діапазон швидкостей, що розглядався, охоплював дорезонансний, резонансний і зарезонансний режими руху. Дослідження проводилися шляхом чисельного експерименту за допомогою математичної моделі у середовищі DELPHI. Розраховувалися потужності, що поглиналися ГА підвіски кожного колеса, миттєві максимальні значення даних потужностей та максимальні вертикальні пришивидження на місці водія і у ц.в.. Сумарна максимальна потужність, яка поглиналася ГА усіх підвісок, склала 2,1...19,5 кВт або 0,57...5,3 % від максимальної потужності двигуна, що свідчить про значні втрати енергії у ГА підвіски БТР-4 та доцільність застосування системи її рекуперації. Дослідження показали, що необхідна плавність ходу в усьому діапазоні швидкостей забезпечується лише при русі у легких дорожніх умовах та, за винятком резонансного режиму, при русі у дорожніх умовах середньої важкості. При русі у важких дорожніх умовах необхідна плавність ходу не забезпечується в усьому діапазоні швидкостей, що говорить про необхідність суттєвого удосконалення підвіски БТР-4, у тому числі значного, у декілька разів, підвищення потужностей, які поглинаються ГА. Зважаючи на це, значно підвищиться і ефективність системи рекуперації, яка, у свою чергу, дозволить вирішити іншу гостру проблему, а саме – перегрів та вихід з ладу ГА. В результаті проведених досліджень, на прикладі бронетранспортера БТР-4, обґрунтовано доцільність розробки та застосування у підвісці військових колісних машин (ВКМ) системи рекуперації енергії того чи іншого типу, яка за умови комплексного удосконалення підвіски зможе повертати для подальшого використання до 15...20 % від максимальної потужності двигуна. Це дозволить суттєво покращити такі показники рухливості, як динамічність, плавність ходу та автономність (запас ходу), що особливо актуально у разі застосування гібридної силової установки та електротрансмисії.

Ключові слова: бронетранспортер, підвіска, гідроамортизатори, дорожні умови, режими руху, потужності, що поглинаються гідроамортизаторами, вертикальні пришивидження, плавність ходу, система рекуперації енергії

Постановка проблеми

При русі по нерівностях енергія, що виробляється двигуном транспортного засобу (ТЗ), витрачається не тільки на подолання опору руху, опору повітря та повороту, але і на збудження коливань підресореного корпусу, які, у свою чергу, для забезпечення необхідної плавності ходу, потрібно гасити за допомогою демпфівальних пристроїв підвіски шляхом перетворення енергії згаданих коливань у тепло. Ці втрати можуть бути досить суттєвими, що призводить до непродуктивних витрат палива і погіршення інших експлуатаційних показників.

Одним із шляхів, за допомогою якого тривалий час намагалися вирішити проблему зменшення втрат на коливання підресореного корпусу, було застосування керування характеристиками вузлів (пружних елементів і демпфівальних пристроїв) та кінематикою підвіски. Тим не менш цей напрям, внаслідок складності та високої вартості реалізації, поки не отримав широкого розповсюдження. Крім того, на функціонування деяких типів систем керування необхідно витрачати до 30 % потужності силової установки, що зводить нанівець економічну складову.

Внаслідок цього на теперішній час виробники ТЗ усе більше приділяють уваги новому перспективному напрямі підвищення їх економічності, а

саме розробці і застосуванню різноманітних систем рекуперації енергії, що поглинається у вузлах підвіски, та повторному її використанню. Особливо це стосується ТЗ з гібридною силовою установкою або з повним електроприводом, поширення яких на сьогодні є світовою тенденцією, де гостро стоїть проблема збільшення запасу ходу.

Для того, щоб застосування даних систем рекуперації було економічно доцільним, необхідно дослідити кількість енергії, яка втрачається при русі ТЗ у найбільш поширених дорожніх умовах та швидкісних режимах експлуатації і з урахування *к.к.д.* конструкції, її вартості та ін., оцінити можливий позитивний ефект від впровадження даних систем. Особливо це актуально для ТЗ, що експлуатуються на ґрунтових дорогах та пересіченій місцевості з високими середніми швидкостями, коли втрати у підвісці можуть бути чималі. Такими ТЗ є ВКМ, і зокрема бронетранспортер БТР-4. Таким чином, дослідження втрат енергії у ГА підвіски бронетранспортера БТР-4 та оцінка доцільності застосування системи її рекуперації, зважаючи у тому числі на можливе застосування гібридної силової установки і електротрансмисії, є актуальною науковою задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [1] представлено результати експериментальних досліджень автомобіля УАЗ-3962, обладнаного лінійними електромагнітними генераторами рекуперації енергії підвіски, з метою оцінки їх працездатності та ефективності. Дослідження проводилися на дорогах з твердим покриттям (у місті і за містом) при швидкостях руху 25, 50 і 75 км/год та на ґрунтових дорогах при швидкостях руху 25 і 50 км/год. Завантаженість автомобіля складала 0, 50 та 100 % (або 0, 350 та 700 кг). Для проведення дослідів вибиралися ділянки автомобільних доріг трьох категорій протяжністю по 100 км. В залежності від категорії дороги, швидкості руху та завантаженості автомобіля сумарна величина виробленої електроенергії складала від 0,3 до 1,9 кВт·год, що відповідно складало 0,45...2,9 % від повної потужності двигуна. При русі автомобіля по ґрунтовій дорозі, внаслідок значно більших зовнішніх впливів, що збурюють, ефективність системи рекуперації енергії в підвісці збільшувалася в 1,5...2,0 рази у порівнянні з рухом по дорогах з покриттям. Застосування системи рекуперації енергії в підвісці незначно (на 1,6 %) збільшило масу автомобіля, проте навіть при мінімальній величині енергії 0,3...0,5 кВт·год, що генерувалася, вона могла забезпечити надійну роботу невеликих за потужністю споживачів. Як висновок вказується, що не дивлячись на все ще недостатній для масового впровадження ефект від використання елек-

тричних амортизаторів, цей напрям є перспективним і його доцільно розвивати у напрямі підвищення ефективності новостворюваних систем рекуперації в підвісках автомобілів.

У роботі [2] наведено паливо-енергетичний баланс автомобіля, де зі 100 % енергії палива, на охолодження та випуск у двигуні припадає 67,4 %, механічні та насосні втрати у двигуні складають близько 10%, втрати у трансмісії – 3,0%, втрати у підвісці – 10,8%, подолання ухилів дороги – 6,6 % та на опір повітря – 2,1 %. Таким чином, навіть у автомобілів цивільного призначення при русі по дорогах з покриттям втрати у підвісці є досить вагомими.

У роботі [3] зазначається, що на лісовозних автомобілях, що експлуатуються у важких дорожніх умовах і на пересіченій місцевості, на коливання автомобіля витрачається до 30 % палива, енергія якого розсіюється через елементи підвіски у вигляді тепла в оточуюче середовище.

У роботі [4] підкреслюється, що перед тим, як почати дослідження з рекуперації енергії затування в автомобільній підвісці, необхідно розрахувати кількість втрат у ній. Розглянуто автомобіль малого класу, що рухався по ділянці міського проспекту довжиною 147 м зі швидкостями до 90 км/год. Кількість енергії, яка розсіювалася в амортизаторах, складала 0,06...0,1 кВт·год, що для гібридного міського автомобіля складає близько 1 % загальної потужності, яку вироблено двигуном. Зроблено висновок, що у підвісці втрачається досить значна енергія.

У роботі [5] запропоновано методику оцінки впливу системи підресорювання важкої військової гусеничної машини на навантаженість її силової установки і трансмісії та розглянуто втрати у системі підресорювання. На реальних трасах (важкі дорожні умови) дані втрати в середньому склали 10...15 % від потужності двигуна, яка витрачалася на рух машини. При русі по гармонічному низькочастотному профілю нерівностей, який відповідав важким дорожнім умовам, втрати у системі підресорювання досягали 30 % від потужності двигуна.

Формулювання мети статті

На прикладі бронетранспортера БТР-4 дослідити кількість енергії, що поглинається ГА підвіски ВКМ (у тому числі підвіски кожного колеса) при русі по реальних трасах різної важкості, в усьому експлуатаційному діапазоні швидкостей. На основі проведених досліджень зробити висновок щодо доцільності розробки і застосування на даних машинах системи рекуперації енергії, яка поглинається ГА підвіски.

Виклад основного матеріалу

Дослідження проводилися шляхом чисельного експерименту за допомогою експериментально перевіреної математичної моделі руху ВКМ по нерівностях, яка була реалізована у середовищі *DELPHI* [6].

Реальні траси, що було обрано для проведення досліджень, викликали низькочастотні коливання підресованого корпусу і являли собою ділянки ґрунтових доріг та пересіченої місцевості випробувального полігону ХКБМ ім. О.О. Морозова. Довжина ділянок, які показані на рис. 1, складала 50 м, висоти

їх нерівностей були виміряні через кожний метр за допомогою оптичного нівеліра. Інтегральні показники інтенсивності дорожнього впливу I_{δ} даних ділянок визначалися за формулою, яка наведена нижче, відповідали легким, середньої важкості та важким дорожнім умовам і дорівнювали відповідно $1030 \text{ мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$, $2580 \text{ мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ і $3980 \text{ мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$ [7].

$$I_{\delta} = \frac{\pi H^2}{4L},$$

де H і L – відповідно середньоарифметичне значення висоти та довжини нерівностей.

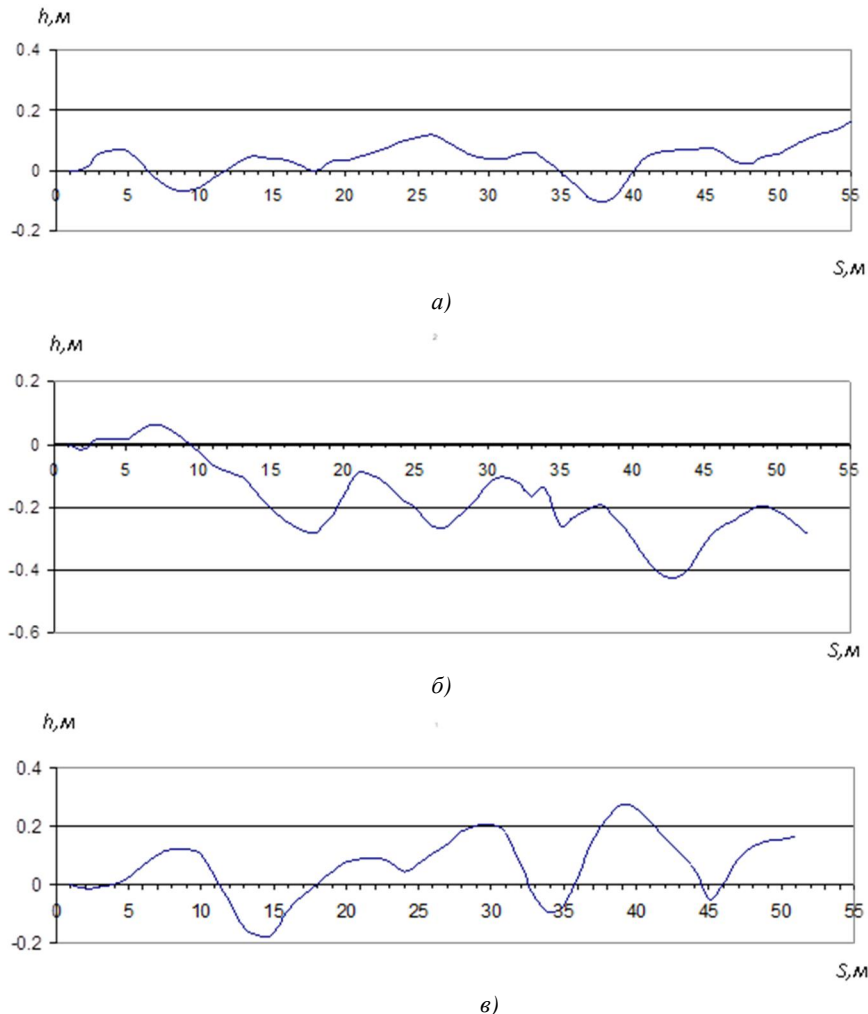


Рис. 1. Профілі ділянок реальних трас:

а) легкі дорожні умови, $I_{\delta}=1030 \text{ мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$; б) дорожні умови середньої важкості, $I_{\delta}=2580 \text{ мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$;

в) важкі дорожні умови, $I_{\delta}=3980 \text{ мм}^2 \cdot \text{м}^{-1}$

Дослідження проводилися в експлуатаційному діапазоні швидкостей 5,56...17,78 м/с (20...64 км/год), який охоплював дорезонансний, резонансний і зарезонансний режими руху. Розраховувалися потужності, що поглиналися ГА кожної підвіски одного борту (на 1-й та 4-й підвісках вони були подвоєні), миттєві максимальні значення даних потужностей та

максимальні вертикальні пришвидшення на місці водія і у ц.в., які свідчили про ефективність роботи ГА та рівень забезпечення необхідної плавності ходу.

На рис. 2-4 показані залежності потужностей, що поглиналися ГА кожної підвіски одного борту, від швидкості руху, відповідно у легких, середньої важкості та важких дорожніх умовах.

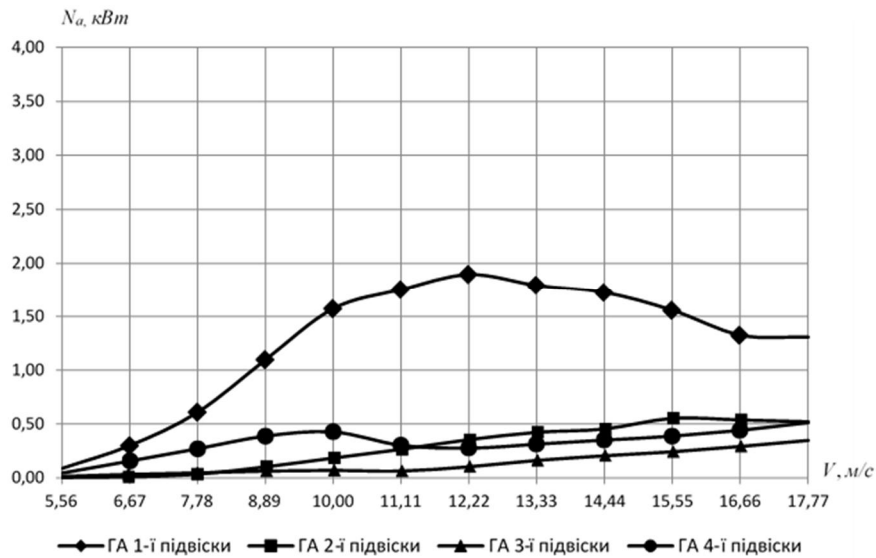


Рис. 2. Потужності, що поглинаються ГА при русі у легких дорожніх умовах

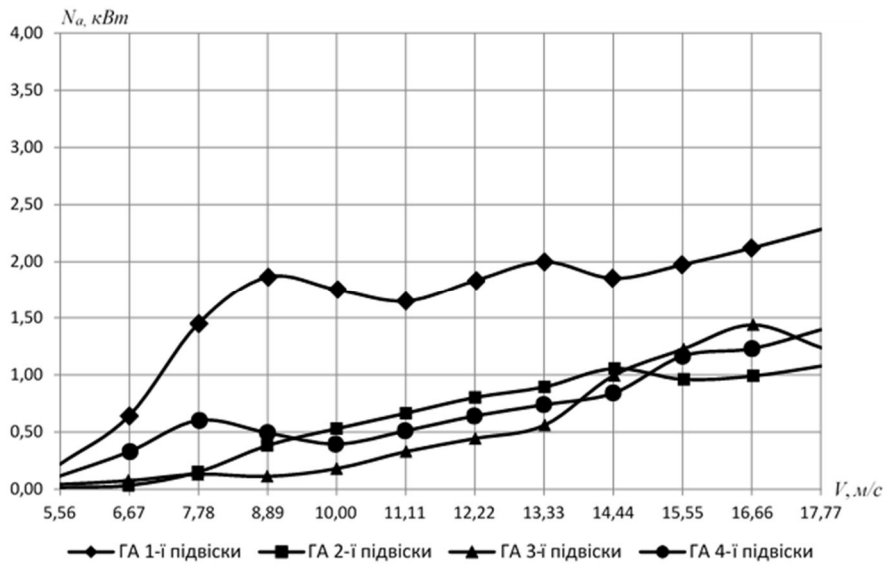


Рис. 3. Потужності, що поглинаються ГА при русі у дорожніх умовах середньої важкості

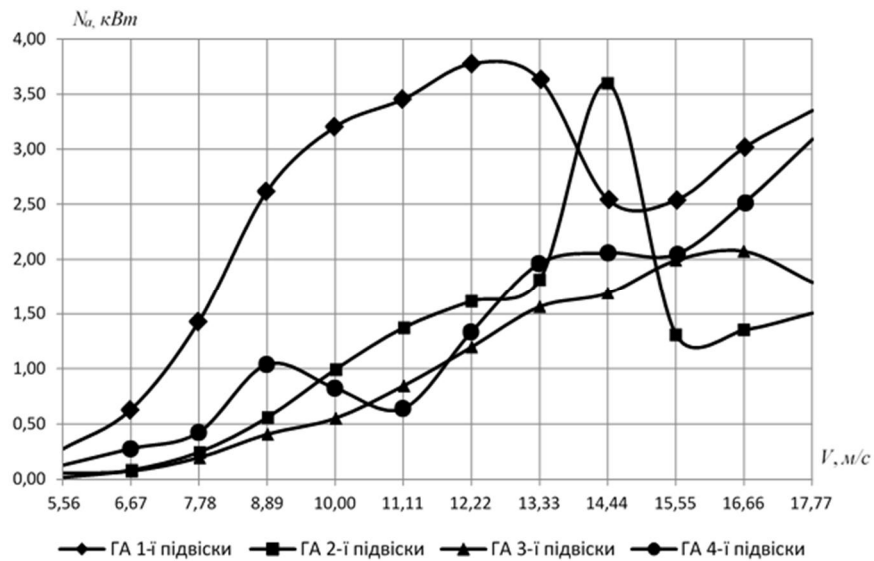


Рис. 4. Потужності, що поглинаються ГА при русі у важких дорожніх умовах

На дорезонансному режимі руху (швидкість до 7,78 м/с або до 28 км/год) максимальна сумарна потужність, що поглиналася ГА підвісок одного борту, складала 1,05 кВт для легких дорожніх умов, 2,4 кВт для умов середньої важкості та 2,45 кВт для важких дорожніх умов. В усіх дорожніх умовах найбільш навантаженими виявилися ГА 1-ї та 4-ї підвісок, причому потужність ГА 1-ї підвіски була у 2...3 рази більшою, ніж ГА 4-ї підвіски, і складала від 0,6 кВт для легких дорожніх умов до 1,45 кВт для важких дорожніх умов. Навантаженість ГА 2-ї та 3-ї підвісок виявилася ще меншою, ніж ГА 1-ї підвіски (до 10 разів у легких дорожніх умовах та до 6 разів у важких дорожніх умовах). Це пояснюється тим, що при русі по нерівностях амплітуди вертикальних і поздовжньо-кутових коливань підресореного корпусу для 1-ї підвіски складаються між собою, а для 4-ї підвіски віднімаються, що обумовлює і відповідні ходи підвіски та швидкості штоків ГА. При цьому ГА 2-ї та 3-ї підвісок при поздовжньо-кутових коливаннях, внаслідок замалих швидкостей переміщення їх штоків, завжди працюють менш ефективно.

У резонансному режимі руху (швидкість 7,78...13,33 м/с або 28...48 км/год) максимальна сумарна потужність, що поглиналася ГА підвісок одного борту, складала 2,8 кВт для легких дорожніх умов, 4,2 кВт для умов середньої важкості та 9,0 кВт для важких дорожніх умов. В усіх дорожніх умовах найбільш навантаженими виявилися теж ГА 1-ї підвіски, потужність яких досягала від 1,9 кВт у легких дорожніх умовах до 3,8 кВт у важких дорожніх умовах. Потужності ГА 2-ї та 4-ї підвісок у легких дорожніх умовах практично зрівнялися і були до 7 разів меншими за потужності, що поглиналися ГА 1-ї підвіски. Робота ГА 3-ї підвіски була ще у 2 рази меншою. При русі у середніх та важких дорожніх умовах робота ГА 2-ї, 3-ї та 4-ї підвісок збільшувалася, але все ж була у 2,5...3,5 рази меншою за роботу ГА 1-ї підвіски.

На зарезонансному режимі руху (швидкість більша за 13,33 м/с або 48 км/год) максимальна сумарна потужність, що поглиналася ГА підвісок одного борту, складала 2,75 кВт для легких дорожніх умов, 6,05 кВт для умов середньої важкості та 9,75 кВт для важких дорожніх умов. І в цьому випадку в усіх дорожніх умовах найбільш навантаженими виявилися ГА 1-ї підвіски, потужність яких досягала від 1,3 кВт у легких дорожніх умовах до 3,4 кВт у важких дорожніх умовах. Ця потужність, у порівнянні з резонансним режимом, дещо зменшувалася (за винятком дорожніх умов середньої важкості), а потужність ГА інших підвісок зростала у 1,5...3,0 рази. Це пояснюється тим, що на зарезонансних режимах руху машина починала

стрибати з нерівності на нерівність та приземлятися на всі підвіски, тобто амплітуди поздовжньо-кутових коливань зменшувалися, а вертикальних коливань збільшувалися, що призводило до більш ефективної роботи внутрішніх підвісок. Тим не менш, і в даному випадку потужність, яка поглиналася ГА 1-ї підвіски, була у 1,5...3,0 рази більшою, ніж потужність інших підвісок.

У залежності від дорожніх умов та режимів руху максимальна сумарна потужність, що поглиналася ГА підвісок обох бортів, складала від 2,1 кВт (легкі дорожні умови, дорезонансний режим) до 18,0 кВт та 19,5 кВт (важкі дорожні умови, відповідно резонансний та зарезонансний режими) або від 0,57 % до 5,3 % від максимальної потужності двигуна, яка дорівнює 367,6 кВт (500 к.с.) (необхідно зазначити, що не обов'язково максимальна потужність двигуна завжди повністю залучалася і двигун не працював на часткових характеристиках). Таким чином, у ГА підвіски БТР-4 безповоротно втрачається значна частина потужності двигуна і застосування системи рекуперації дозволить в остаточному підсумку суттєво покращити такі показники рухливості, як динамічність, плавність ходу та автономність (запас ходу), особливо у разі застосування гібридної силової установки та електротрансмисії.

Представлені вище результати свідчать, що ГА 1-их підвісок обох бортів поглинали потужність від 1,2 кВт (легкі дорожні умови, дорезонансний режим) до 7,6 кВт (важкі дорожні умови, резонансний режим) та до 6,8 кВт (важкі дорожні умови, зарезонансний режим), що складало відповідно 57,14 %, 42,22 % та 34,87% від загальної потужності, яка поглиналася ГА усіх підвісок. Про значну роботу ГА 1-их підвісок свідчать і графіки миттєвих потужностей, що поглинаються ГА кожної підвіски у легких і середньої важкості дорожніх умовах, які представлено відповідно на рис. 5-6.

З даного факту можна зробити висновок, що систему рекуперації енергії, яка поглинається ГА, можливо застосувати лише на 1-их підвісках, оскільки саме на них в середньому припадає половина згаданої потужності. На інших же підвісках можна залишити звичайні ГА, що забезпечить зниження вартості застосування системи рекуперації, її ваги та підвищить надійність і працездатність підвіски у цілому.

Необхідно зазначити, що навіть з урахуванням к.к.д. дана система рекуперації дозволить виробляти кількість енергії порівнянну з енергією штатного генератора марки 6301.3701 номінальною потужністю 4,2 кВт, що використовується.

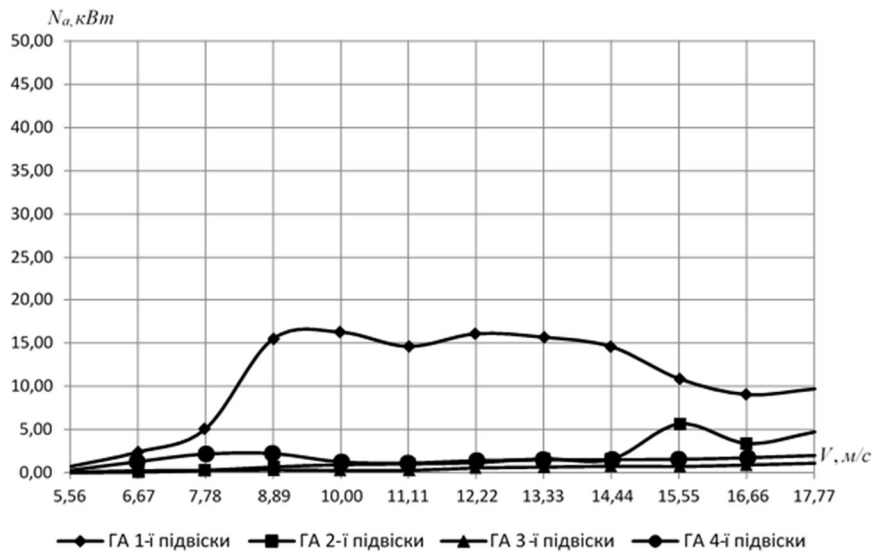


Рис. 5. Миттєві потужності, що поглинаються ГА при русі у легких дорожніх умовах

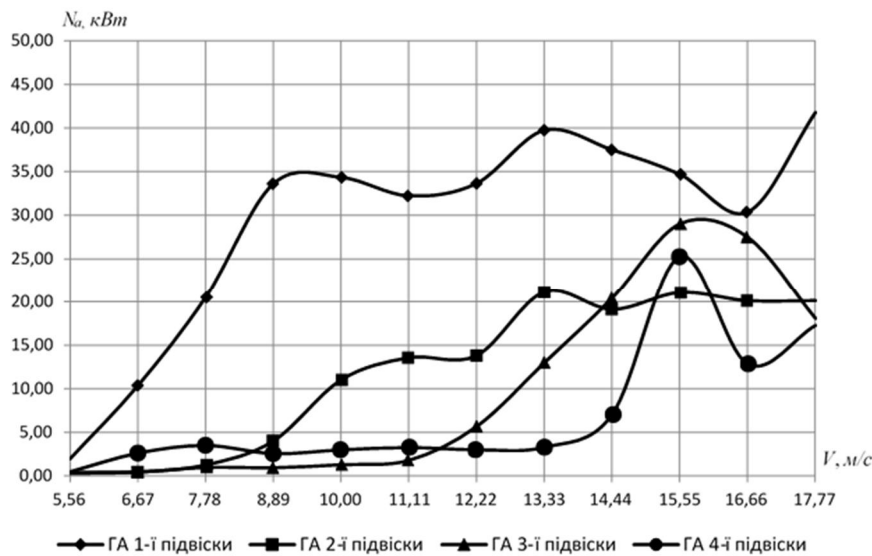


Рис. 6. Миттєві потужності, що поглинаються ГА при русі у дорожніх умовах середньої важкості

Проведемо оцінку плавності ходу БТР-4 та ефективності роботи його підвіски і зокрема ГА при русі по ділянках дорожніх умов, які розглядаються.

На рис. 7-8 показані залежності максимальних вертикальних пришвидшень на місці водія та у ц.в. від швидкості руху, відповідно у легких і середньої важкості дорожніх умовах. Допустимим рівнем зазначених пришвидшень, з ергономічних вимог по плавності ходу, у даних дорожніх умовах (низькочастотний профіль нерівностей) є 3 g (29,43 м/с²).

Як витікає з наведених залежностей, при русі у легких дорожніх умовах максимальні пришвидшення на місці водія та у ц.в., в усьому діапазоні швидкостей не перевищують 1,34 g (13,1 м/с²), що у 2,24 рази менше за допустимий рівень. При русі у дорожніх

умовах середньої важкості необхідна плавність ходу забезпечується лише на дорезонансному та зарезонансному режимах руху. На резонансному ж режимі, у діапазон швидкостей 10,33...12,98 м/с (37,2... 46,7 км/год), вертикальні пришвидшення на місці водія перевищують допустимі 3 g.

У разі ж руху у важких дорожніх умовах, практично в усьому діапазоні швидкостей, що розглядався (20...64 км/год), вертикальні пришвидшення як на місці водія, так і у ц.в. перевищували допустимі 3 g, що свідчить про недосконалість підвіски бронетранспортера БТР-4 та її невідповідність сучасним вимогам (зокрема, вона має замалий динамічний хід та недостатню енергоємність ГА).

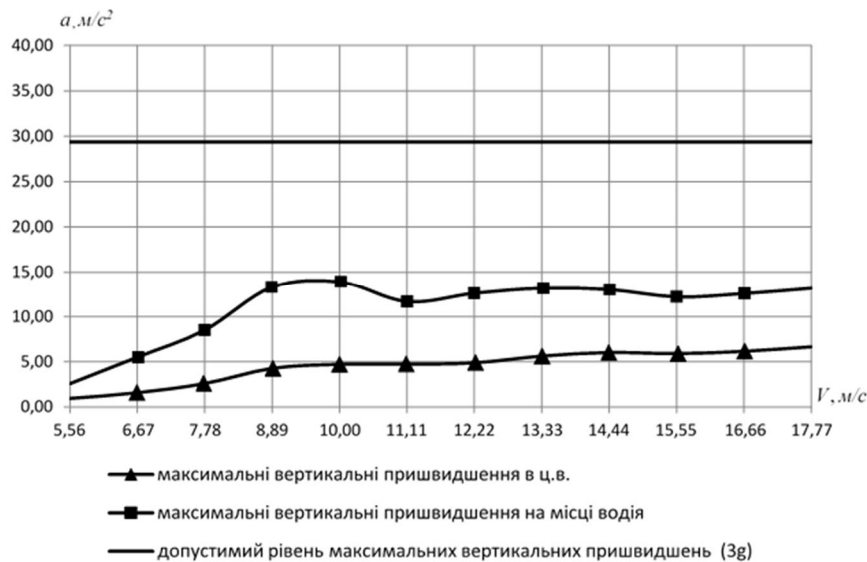


Рис. 7. Максимальні вертикальні пришвидшення на місці водія та у ц.в. при русі у легких дорожніх умовах

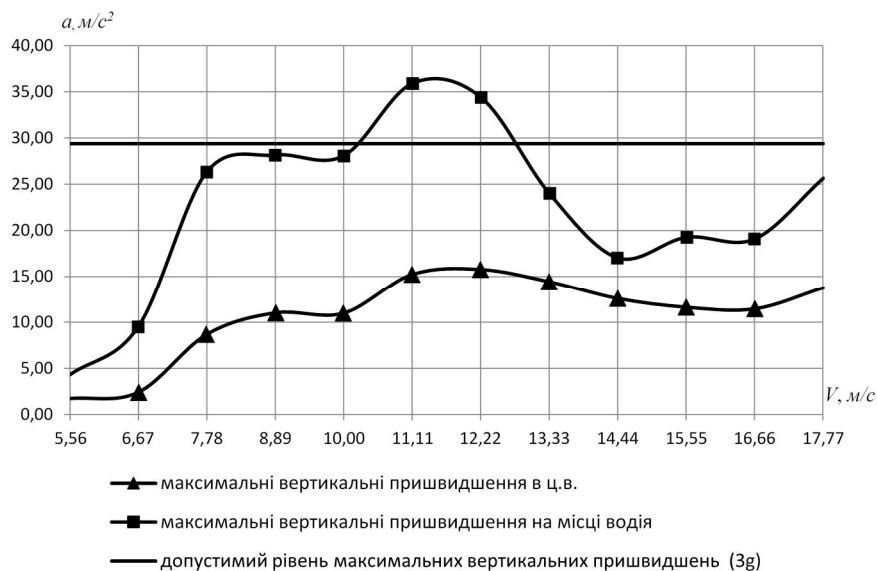


Рис. 8. Максимальні вертикальні пришвидшення на місці водія та у ц.в. при русі у дорожніх умовах середньої важкості

Необхідно зазначити, що до підвісок сучасних і перспективних військових машин висуваються досить жорсткі вимоги. Вони повинні забезпечувати необхідну з ергономічних вимог плавність ходу, при середніх швидкостях руху до 50...55 км/год, у 95 % дорожніх умов, що зустрічаються, включно з пересіченою місцевістю. На сьогоднішній день це є складною науково-технічною проблемою, вирішення якої вимагає проведення глибоких науково-дослідницьких та дослідно-конструкторських робіт [8].

Аналіз відповідності підвіски вітчизняних бронетранспортерів БТР-3, БТР-4 та «Дозор-Б» сучасним вимогам, перспективні напрями їх удосконалення та практичні результати проведених у даних напрямках досліджень було авторами докладно представлено у роботах [9, 10, 11]. Відзначалося, що підвіска даних

ВКМ не відповідає сучасним вимогам і вимагає суттєвого удосконалення. Про це свідчать і результати, що представлені у даній статті, коли рух БТР-4 по ділянці, яка відповідала важким дорожнім умовам, внаслідок не виконання ергономічних вимог, був неможливим в усьому діапазоні швидкостей, що досліджувався.

Одним з напрямів удосконалення підвіски даних машин є значне збільшення динамічного ходу підвіски та підвищення у разі потужностей, які поглинаються ГА, що для звичайних їх конструкцій є неможливим. Однак у разі застосування системи рекуператії проблема збільшення енергоємності демпфірувальних пристроїв з метою забезпечення необхідної плавності ходу при русі у важких дорожніх умовах буде автоматично вирішена, бо зникне головний стримуючий

фактор – небезпека перегріву та виходу з ладу ГА. При цьому у порівнянні з отриманими вище результатами значно підвищиться ефективність системи рекуперації, яка у разі її застосування і на підвісках 4-х коліс, зможе повертати для подальшого використання до 15...20% від максимальної потужності двигуна. Це буде залежати від к.к.д. конкретного типу системи рекуперації, вибір якого та його технічна реалізація є окремою складною науково-дослідницькою задачею.

Висновки

1. Потужності, що поглинаються ГА підвіски БТР-4, починаючи зі швидкості руху 5,56 м/с (20 км/год), різко зростають в усіх дорожніх умовах.

2. Сумарна максимальна потужність, що поглиналася ГА, в залежності від швидкості руху та дорожніх умов, складала 2,1...19,5 кВт або 0,57...5,3 % від максимальної потужності двигуна. Таким чином, навіть у недостатньо енергоємних і ефективних ГА підвіски БТР-4 безповоротно втрачається значна частина енергії двигуна і застосування системи її рекуперації є доцільним та відповідає сучасному світовому перспективному напрямку підвищення економічності ТЗ.

3. Найбільш навантаженими в усіх дорожніх умовах та режимах руху виявилися ГА 1-ї підвіски, які в залежності від швидкості руху та дорожніх умов поглинали максимальну потужність у 1,5...6,0 разів більшу за ГА 4-ї підвіски і у 1,5...12,0 разів більшу за ГА 2-ї та 3-ї підвісок, при цьому ГА 2-ї та 3-ї підвісок починали інтенсивно працювати лише на зарезонансних режимах при швидкостях руху більших за 13,33 м/с (48 км/год).

4. ГА 1-их підвісок обох бортів поглинали потужність від 1,2 кВт (легкі дорожні умови, дорезонансний режим) до 7,6 кВт (важкі дорожні умови, резонансний режим) та до 6,8 кВт (важкі дорожні умови, зарезонансний режим), що складало відповідно 57,14 %, 42,22 % та 34,87 % від загальної потужності, яка поглиналася ГА усіх підвісок. Таким чином, систему рекуперації енергії, яка поглинається ГА, можливо застосувати лише на 1-их підвісках, оскільки саме на них в середньому припадає половина згаданої потужності. На інших же підвісках можна залишити звичайні ГА, що забезпечить зниження вартості застосування системи рекуперації, її ваги та підвищить надійність і працездатність підвіски у цілому. Навіть з урахуванням к.к.д. дана система рекуперації дозволить виробляти кількість енергії порівнянну з енергією штатного генератора марки 6301.3701 номінальною потужністю 4,2 кВт, що використовується.

5. Необхідна плавність ходу (максимальні вертикальні пришвидшення на місці водія та у ц.в. менші за 3 g) в усьому діапазоні швидкостей забезпечувалася лише при русі у легких дорожніх умовах та за винятком резонансного режиму (37,2...46,7 км/год) при русі у дорожніх умовах середньої важкості. У важких дорожніх умовах необхідна плавність ходу не забезпечувалася в усьому діапазоні швидкостей (20...64 км/год), що говорить про необхідність суттєвого удосконалення підвіски БТР-4, у тому числі значного, у декілька разів, підвищення потужностей, які поглинаються ГА, що для звичайних їх конструкцій є неможливим. У свою чергу, застосування системи рекуперації дозволить вирішити дану проблему, не побоюючись перегріву та виходу з ладу ГА.

6. В результаті проведених досліджень, на прикладі бронетранспортера БТР-4, обґрунтовано доцільність розробки та застосування у підвісці ВКМ системи рекуперації енергії того чи іншого типу, яка за умови комплексного удосконалення підвіски зможе повертати для подальшого використання до 15...20 % від максимальної потужності двигуна. Це, в остаточному підсумку, дозволить суттєво покращити такі показники рухливості, як динамічність, плавність ходу та автономність (запас ходу), що особливо актуально у разі застосування гібридної силової установки та електротрансмисії.

Список літератури

1. Посметьев В. И. Оценка эффективности применения системы рекуперации энергии в подвеске автомобиля. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ)*. 2012. № 02 (076). С. 486–500. URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/02/pdf/41.pdf>.

2. Говорущенко Н. Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований). Харьков: ХНАДУ, 2011. 292 с.

3. Никонов В. О., Посметьев В. И. Состояние проблемы и анализ конструкций систем рекуперации энергии в подвесках колесных машин. *Воронежский научно-технический вестник*. 2018. № 2 (24). С. 20–39.

4. Liesionis V., Markšaitis D., Daniulaitis V. Analysis of energy dissipation of shock-absorber during random excitation. *Mechanika*. 2007. № 3 (65). P. 42–45.

5. Дущенко В.В., Мусницька І.В. Оцінка впливу системи підресорювання гусеничної машини на навантаженість її силової установки і трансмісії. *Механіка та машинобудування*. 2011. № 1. С. 98–103.

6. Александров Е. Е., Волонцевич Д. О., Дущенко В. В., Епифанов В. В., Кохановский Н. В. Математическое моделирование процессов возмущенного движения агрегатов и систем бронетанковой техники: учебное пособие. Харьков: НТУ “ХПИ”, 2012. 356 с.

7. Герр Ю. Б., Соловьев В. М., Шпак Ф. П. Об интегральном статистическом показателе воздействия микропрофиля на транспортные машины. *Вестник бронетанковой техники*. 1974. № 5. С. 9–13.

8. Дущенко В. В. Системи підресорювання військових гусеничних і колісних машин: розрахунок та синтез. Харків: НТУ “ХПИ”, 2018. 336 с.

9. Дущенко В. В., Маслієв А. О., Ярмач О. М., Цимбал Г. І. Спецтема. *Механіка та машинобудування*. 2017. № 2. С. 76–88.

10. Дущенко В. В., Воронцов С. М., Ярмач М. С., Нанівський Р. А., Цимбал Г. І. Спецтема. *Механіка та машинобудування*. 2018. № 2. С. 53–63.

11. Дущенко В. В., Воронцов С. М., Колбасов О. М., Маслієв А. О., Ярмач О. М. Спецтема. *Механіка та машинобудування*. 2018. № 2. С. 69–80.

Reference

1. Posmetiev V.I. (2012), “*Ocenka effektivnosti primeneniia sistemy rekuperatsyi enerhii v podveske avtomobilia*” [Evaluation of the energy recovery system efficiency use in the vehicle suspension] Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. Issue 02 (076). pp. 486–500. URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/02/pdf/41.pdf>. [in Russian].

2. Hovorushchenko N.Ya. (2011), “*Sistemotekhnika avtomobilnogo transporta (raschetnye metody issledovaniia)*” [System engineering of automobile transport (calculation research methods)]. KhNADU, Kharkov, 292 p. [in Russian].

3. Nikonov V.O., Posmetiev V.I. (2018), “*Sostoianie problemy i analiz konstrukcii sistem rekuperatsii enerhii v podveskakh kolesnykh mashyn*” [State of problem and analysis of structures of energy recovery systems in the suspensions of wheeled vehicles]. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. Issue 2 (24). pp. 20–39. [in Russian].

4. Liesionis V., Markšaitis D., Daniulaitis V. (2007), Analysis of energy dissipation of shock-absorber during random excitation. *Mechanika*. Issue 3 (65). pp. 42–45. [in English].

5. Dushchenko V.V., Musnytska I.V. (2011), “*Otsinka vplyvu systemy pidresoriuvannia husenychnoi mashyny na navantazhenist ii sylovoi ustanovky i transmisii*” [Influence estimation of suspension system of the tracked car on loading of its power plant and transmission]. *Mechanics and mechanical engineering*. Issue 1. pp. 98–103. [in Ukrainian].

6. Aleksandrov E.E., Volontsevich D.O., Dushchenko V.V., Epiphonov V.V., Kokhanovskii N.V. (2012), “*Matematicheskoe modelirovanie processov vozmushchennoho dvizheniia ahreatov i sistem bronetankovoi tekhniki*” [Mathematical modeling of disturbed movement processes of armored vehicle pieces and systems]: Tutorial. NTU “KhPI”, Kharkov, 356 p. [in Russian].

7. Herr Yu.B., Soloviov V.M. Shpak F.P. (1974), “*Ob intehralnom ststisticheskom pokazatele vozeistviia mikroprophilia na transportnye mashyny*” [On the integral statistical indicator of the micro-profile impact on transport vehicles]. *Bulletin of armored vehicles*. Issue 5. pp. 9–13. [in Russian].

8. Dushchenko V.V. (2018), “*Systemy pidresoriuvannia viiskovykh husenychnykh i kolisnykh mashyn: rozrakhunok i syntez*” [Suspension systems of military tracked and wheeled vehicles: calculation and synthesis]. NTU “KhPI”, Kharkiv, 336 p. [in Ukrainian].

9. Dushchenko V.V., Masliev A.O., Yarmak O.M., Tsymbal H.I. (2017), “*Spetstema*” [Special topic]. *Mechanics and mechanical engineering*. Issue 2. pp. 76–88. [in Russian].

10. Dushchenko V.V., Vorontsov S.M., Yarmak O.M., Nanivskyi R.A., Tsymbal H.I. (2018), “*Spetstema*” [Special topic]. *Mechanics and mechanical engineering*. Issue 2. pp. 53–63. [in Russian].

11. Dushchenko V.V., Vorontsov S.M., Kolbasov O.M., Masliev A.O., Yarmak O.M. (2018), “*Spetstema*” [Special topic]. *Mechanics and mechanical engineering*. Issue 2. pp. 69–80. [in Russian].

Исследование потерь энергии в гидроамортизаторах подвески бронетранспортера БТР-4 и оценка целесообразности применения системы ее рекуперации

В.В. Дущенко, С.Н. Воронцов, Р.А. Нанівський

Представлены исследования потерь энергии в гидроамортизаторах (ГА) подвески бронетранспортера БТР-4 при движении по трем участкам грунтовых дорог и пересеченной местности, которые отвечали легким, средней тяжести и тяжелым дорожным условиям. Диапазон скоростей, который рассматривался (20...64 км/ч), охватывал дрезонансный, резонансный и зарезонансный режимы движения. Исследования проводились путем численного эксперимента с помощью экспериментально проверенной математической модели движения военной колесной машины по неровностям, которая была реализована в среде DELPHI. Рассчитывались мощности, поглощаемые ГА подвески каждого колеса, мгновенные максимальные значения данных мощностей и максимальные вертикальные ускорения на месте водителя и в ц.т., свидетельствующие об эффективности работы ГА и уровне обеспечения необходимой плавности хода. Суммарная максимальная мощность, поглощаемая ГА всех подвесок, в зависимости от скорости движения и

дорожных условий, составила 2,1...19,5 кВт или 0,57...5,3 % от максимальной мощности двигателя, что свидетельствует о значительных потерях энергии в ГА подвески БТР-4 и целесообразности применения системы ее рекуперации. Наиболее нагруженными во всех дорожных условиях и режимах движения оказались ГА 1-х подвесок, которые поглощали мощности от 1,2 кВт (легкие дорожные условия, дорезонансный режим), 7,6 кВт (тяжелые дорожные условия, резонансный режим) и до 6,8 кВт (тяжелые дорожные условия, зарезонансный режим), что составило соответственно 57,14 %, 42,22 % и 34,87 % от общей мощности, которая поглощалась ГА всех подвесок. Таким образом, систему рекуперации энергии можно применить только на 1-х подвесках, поскольку именно на них в среднем приходится половина энергии, которая поглощается всеми ГА. Это обеспечит снижение стоимости данной системы, ее веса и повысит надежность и работоспособность подвески в целом. Даже с учетом к.п.д. такая система рекуперации позволит производить количество энергии, сравнимое с энергией штатного генератора марки 6301.3701 номинальной мощностью 4,2 кВт. Исследования показали, что необходимая плавность хода (максимальные вертикальные ускорения на месте водителя и в ц.т. меньшие, чем 3 g) во всем диапазоне скоростей обеспечивается только при движении в легких дорожных условиях, и, за исключением резонансного режима (37,2 ... 46,7 км/ч), при движении в дорожных условиях средней тяжести. При движении в тяжелых дорожных условиях необходима плавность хода не обеспечивается во всем диапазоне скоростей, что говорит о необходимости существенного усовершенствования подвески БТР-4, в том числе значительного, в несколько раз, повышение мощностей, которые поглощаются ГА. В этом случае существенно повысится и эффективность системы рекуперации, которая, в свою очередь, позволит решить другую острую проблему, а именно – перегрев и выход из строя ГА. В результате проведенных исследований, на примере бронетранспортера БТР-4, обоснована целесообразность разработки и применения в подвеске военной колесной машины системы рекуперации энергии того или иного типа, которая при условии комплексного совершенствования подвески сможет возвращать для дальнейшего использования до 15...20 % от максимальной мощности двигателя. Это позволит существенно улучшить такие показатели подвижности, как динамичность, плавность хода и автономность (запас хода), что особенно актуально в случае применения гибридной силовой установки и электротрансмиссии.

Ключевые слова: бронетранспортер, подвеска, гидроамортизаторы, дорожные условия, режимы движения, мощности, поглощаемые гидроамортизаторами, вертикальные ускорения, плавность хода, система рекуперации энергии

Investigation of energy losses in hydraulic shock absorbers of the BTR-4 armored personnel carrier suspension and assessment of the feasibility of using its recovery system

V. Dushchenko, S. Vorontsov, R. Nanivsky

Investigations of energy losses in hydraulic shock absorbers (HSA) of the BTR-4 armored personnel carrier while driving along three sections of unpaved roads and rough terrain, which met light, moderate and heavy road conditions, are presented. The speed range that was considered (20...64 km/h) covered the pre-resonant, resonant and non-resonant modes of motion. The studies were carried out by a numerical experiment using an experimentally verified mathematical model of the motion of a military wheeled vehicle along roughnesses, which was implemented in the DELPHI environment. The power was calculated, the HSA of the suspension of each wheel were absorbed, the instantaneous maximum values of these powers and the maximum vertical accelerations at the driver's seat and at the center, indicating the efficiency of the HSA and the level of ensuring the necessary smoothness. The total maximum power absorbed by the HSA of all suspensions, depending on the speed and road conditions, amounted to 2,1...19,5 kW or 0,57 ... 5,3 % of the maximum engine power, which indicates significant losses energy in the suspension vehicle BTR-4 and the feasibility of using its recovery system. HSAs of 1 suspension, which absorbed power from 1,2 kW (light road conditions, pre-resonance mode), 7,6 kW (heavy road conditions, resonance mode) and up to 6,8 kW (heavy road conditions, out-of-resonance mode), were the most loaded in all road conditions and driving modes, which amounted to 57,14 %, 42,22 % and 34,87 % of the total power, which was absorbed by the HSA of all suspensions. Thus, the energy recovery system can be used only on 1 suspension, since it is on them that on average accounts for half the energy that is absorbed by all HSAs. This will reduce the cost of this system, its weight and increase the reliability and performance of the suspension as a whole. Even taking into account the efficiency, such a recovery system will allow producing an amount of energy comparable to the energy of a regular brand 6301.3701 generator with a rated power of 4,2 kW. Studies have shown that the required smoothness of travel (maximum vertical accelerations at the driver's place and, in particular, less than 3 g) in the entire speed range is provided only when driving in light road conditions, and, with the exception of the resonance mode (37,2...46,7 km/h) when driving in moderate traffic conditions. When driving in difficult road conditions, the required ride smoothness is not provided in the entire speed range, which indicates the need for a significant improvement of the BTR-4 suspension, including a significant, several-fold increase in the power absorbed by the HSA. In this case, the efficiency of the recovery system will also significantly increase, which, in turn, will solve another acute problem, namely, overheating and failure of the HSA. As a result of the studies carried out using the BTR-4 armored personnel carrier as an example, the feasibility of developing and using an energy recovery system of one type or another in the suspension of a military wheeled vehicle is substantiated, which, provided the suspension is comprehensively improved, can return up to 15...20 % of maximum power for future use engine. This will significantly improve such indicators of mobility as dynamism, smoothness and autonomy (power reserve), which is especially important in the case of using a hybrid power plant and electric transmission.

Key words: armored personnel carrier, suspension, hydraulic shock absorbers, road conditions, driving modes, power absorbed by hydraulic shock absorbers, vertical accelerations, smoothness, energy recovery system