

О. І. ЗИНЧЕНКО

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗРОБОК ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ПІДРЕСОРИЮВАННЯ БРОНЕМАШИН ЛЕГКОЇ КАТЕГОРІЇ ЗА МАСОЮ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ)

Проведений аналіз матеріалів з питань проектування бронемашин легкої категорії. Розглянуті основні математичні моделі з моделювання динамічних процесів, напружено-деформованого стану у системі «бойовий модуль – корпус – підвіска». Проаналізовані публікації по проектуванню торсіонних валів підвіски. Оскільки на сьогоднішній день відсутня відповідна теоретична база для розв'язання задач параметричного синтезу елементів систем підресорювання, а існуючі математичні моделі потребують вдосконалення, то ставляться основні задачі, які потребують розв'язання або вдосконалення існуючих рішень. Також потрібні такі розробки, які б враховували технічні рішення, процеси і стани, етапи виготовлення, умови експлуатації та бойового застосування, тобто такі, що відображали б усі етапи життєвого циклу елементів систем підресорювання легких броньованих машин.

Ключові слова: легка броньована машина; тактико-технічні характеристики; торсіонний вал; системи підресорювання; підресорювана частина; підвіска; напружено-деформований стан

Е.И. ЗИНЧЕНКО

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ПОДРЕССОРИВАНИЯ БРОНЕМАШИН ЛЕГКОЙ КАТЕГОРИИ ПО МАССЕ (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)

Проведен анализ материалов по вопросам проектирования бронемашин легкой категории. Рассмотрены основные математические модели по моделированию динамических процессов, напряженно-деформированному состоянию в системе «боевой модуль – корпус – подвеска». Проанализированы публикации по проектированию торсионных валов подвески. Поскольку на сегодняшний день отсутствует соответствующая теоретическая база для решения задач параметрического синтеза элементов систем поддресоривания, а существующие математические модели требуют усовершенствования, то ставятся задачи, которые требуют решения или усовершенствования имеющихся решений. Также необходимы такие разработки, которые бы учитывали технические решения, процессы и состояния, этапы изготовления, условия эксплуатации и боевого применения, то есть такие, которые бы отображали все этапы жизненного цикла элементов систем поддресоривания легких бронированных машин.

Ключевые слова: легкая бронированная машина; тактико-технические характеристики; торсионный вал; системы поддресоривания; поддресоренная часть; подвеска; напряженно-деформированное состояние

O. ZINCHENKO

ANALYTICAL REVIEW OF RESEARCH AND DEVELOPMENT OF ELEMENTS OF SUSPENSION SYSTEMS OF ARMORED VEHICLES OF LIGHT CATEGORY BY MASS (REVIEW ARTICLE)

The analysis of materials on the design of light armored vehicles is carried out. The main mathematical models for modeling dynamic processes, stress-strain state in the system "combat module - hull - suspension" are considered. The publications on the design of suspension torsion bars are analyzed. To date, the analysis and synthesis are not united by a single generalized parametrical description, which would cover both technical solutions of elements of suspension of light armored vehicles, modes of motion of these machines, and properties of materials of the elements under study, and requirements for tactics and technical characteristics in general. That is, there is no corresponding theoretical base for solving the problems of parametric synthesis of elements of suspension systems, and existing mathematical models need to be improved. Therefore, the main tasks that need to be solved or improved by existing solutions are set. Also, such developments are needed that would take into account technical solutions, processes and conditions, stages of manufacture, operating conditions and combat use, that is, those that would reflect all stages of the life cycle of the elements of suspension systems for light armored vehicles.

Keywords: light armored vehicle; tactical and technical characteristics; torsion bar; suspension systems; sprung part; suspension; stress-strain state

Вступ. На сьогоднішній день має місце тенденція створення високоефективних відносно легких та малогабаритних бронемашин. Ці легкі бойові броньовані машини різного призначення мають прийти на заміну основним бойовим танкам, самохідним артилерійським установкам та іншим важким машинам. Очікується, що такі бойові машини мають бути за своїми вогневими можливостями та експлуатаційними характеристиками кращими за попередні бойові машини. У першу чергу необхідне поліпшення тактико-технічних характеристик (ТТХ) сучасних вітчизняних легких броньованих машин (ЛБМ). Це досягається впливом на структуру і параметри основних елементів бронемашин.

При проектному обґрунтуванні параметрів ос-

новних елементів бронемашин необхідно враховувати весь спектр діючих навантажень і виникаючих при цьому фізико-механічних процесів [1].

Підвищення швидкості руху таких машин по дорогах та пересіченій місцевості призвело до появи нових складних систем підвісок військових гусеничних та колісних машин, до складу яких входять високонавантажені торсіонні вали, що складають складову частину системи підресорювання транспортного засобу і відносяться до пружних елементів. На сьогоднішній день властивості торсіонних валів вивчені недостатньо повно, а їх удосконалення становить актуальну задачу [2].

Основними показниками, що характеризують

© О. І. Зінченко, 2021

якість військових гусеничних та колісних машин, є їх вогнева потужність, захищеність та рухомість, у забезпеченні яких істотну роль відіграє система підресорювання (СП).

Останнім часом спостерігається тенденція вдосконалення вузлів СП шляхом управління їх характеристиками, для чого розробляються відповідні методології аналізу та синтезу.

Для визначення нових перспективних напрямків подальшого розвитку СП необхідно здійснити глибокий функціонально-фізичний аналіз роботи їх складових частин та з'ясувати взаємозв'язки цих частин між собою та навколишнім середовищем [3].

Мета роботи. На основі здійсненого аналізу існуючих моделей та методів досліджень обґрунтувати необхідність формулювання і вирішення загальної проблеми – розробки теоретичних основ синтезу елементів систем підресорювання бронемашин легкої категорії за масою з метою поліпшення тактико-технічних характеристик сучасних вітчизняних легких броньованих машин.

Основні вимоги до систем підресорювання легких броньованих машин. Основними вимогами, які висуваються до підвіски ЛБМ, є:

- висока плавність ходу;
- міцність, надійність та висока зносостійкість вузлів;
- мала маса та мінімальний об'єм підвіски;
- здатність вирішувати бойові задачі при руйнації окремих деталей та вузлів;
- простота обслуговування: легкість монтажу та демонтажу.

До показників плавності ходу відносять значення вертикальних прискорень корпусу, а також амплітуду і швидкість кутових коливань корпусу. У теорії підресорювання більшість задач пов'язана з визначенням максимального значення параметрів плавності ходу машини, що проектується, або вже існуючої машини при обраних конструктивних параметрах її системи, заданій висоті нерівностей h і швидкості v машини [2].

Основною задачею проектування легких броньованих машин є: зменшення амплітуди коливань підресореної частини (ПЧ) порівняно із амплітудою зовнішніх збурень. Це призведе до мінімізації впливу зовнішніх чинників на коливання встановленого озброєння з метою виконання ним функціонального призначення.

Ідеальною СП є така система, яка на місцевості, близькій до горизонтальної, дозволяє рухатися по всіх можливих дорожніх профілях нерівностей без коливань підресореного корпусу машини, а у випадку місцевості з пагорбами – долати підйоми та спуски з мінімальними пришвидшеннями, швидкостями і зміною положення даного корпусу [3].

Удосконалення СП ЛБМ має метою:

- поліпшити умови роботи екіпажу;
- знизити динамічну навантаженість вузлів ходової частини і устаткування;
- забезпечити ефективну стрільбу з ходу;
- підвищити середню швидкість руху на місцевості;
- зменшити масу СП;

- підвищити довговічність тощо.

Аналіз існуючих методів та моделей досліджень. У вітчизняній науці розробляються та удосконалюються моделі та методи досліджень, які дають можливість розробляти рекомендації стосовно проектних рішень при проектуванні систем підресорювання транспортних засобів [1, 3, 4].

Інтенсивні пошукові дослідження в цьому напрямку ведуться у багатьох країнах світу [2, 5–11].

У [5] дослідження присвячене впливу характеристик на параметри торсійної підвіски в електричному автомобілі. У статті проаналізовано динамічне навантаження на шину, робочий простір підвіски і параметри комфорту. Оптимізовані основні параметри торсіона.

Також неупинно ведуться дослідження й інших видів підвіски. Наприклад, досліджуються підвіски з іншим основним пружним елементом – гідроамортизатором [12]. У статті зазначається, що одним із напрямів удосконалення таких підвісок є значне збільшення динамічного ходу підвіски та підвищення у рази потужностей, які поглинаються гідроамортизатором, що для звичайних їх конструкцій є неможливим.

У праці [3] проведено аналіз критеріїв розвитку та показників якості сучасних СП і зазначено, що вони не можуть задовольнити підвищені вимоги, що висуваються до перспективних ЛБМ. Також зазначаються основні протиріччя, які заважають вирішенню проблеми синтезу і розглядаються можливі шляхи усунення цих протиріч.

У працях (Б.І. Сокіл, М.Г. Грубель, М.Б. Сокіл, Р.А. Нанівський) [13, 14] досліджено вертикальні коливання ПЧ колісних транспортних засобів та отримані умови існування та залежність резонансної амплітуди цих коливань від динамічних характеристик підвіски (відновлювальної сили пружних амортизаторів) [15].

У статті [16] проводиться теоретичний аналіз впливу параметрів підвіски бойової колісної машини на коливання корпусу машини разом з його бойовим модулем. Порівняні лінійна і нелінійна силові характеристики СП з точки зору ефективності ведення вогню. Розглянуті вертикальні і поперечно-кутові коливання корпусу.

На сьогоднішній день відсутня відповідна теоретична база для розв'язання задач параметричного синтезу елементів СП. А існуючі математичні моделі потребують удосконалення, які будуть враховувати велику низку питань, що необхідно буде вирішити.

Розглянемо основні питання, на які спираються математичні моделі відомих сучасних вчених у процесі дослідження динамічних процесів, які виникають в корпусі і ходовій частині ЛБМ. У статтях [15-17] наведені математичні та фізичні моделі цих динамічних процесів. За основу береться комплексна математична модель [18, 19], яка описує процеси, що протікають у системах машини в період її роботи, і має форму системи диференціальних рівнянь. Основною відмінністю математичної моделі у [17] порівняно з [18,19] є те, що додатково вводяться узагальнені координати і ураховуються

пружні та демпферні зв'язки між елементами підвіски. При розв'язанні задачі за вхідні дані беруться масово-геометричні характеристики транспортного засобу, елементів підвіски, профіль дороги, режими руху тощо, а за вихідні дані - переміщення, швидкості, прискорення і силові фактори підвіски і корпусу.

Розрахунок СП базується на розв'язанні диференціальних рівнянь, які відображають зв'язок коливань підресорених мас (корпусу) машини з її конструктивними параметрами і умовами руху. У загальному вигляді ці диференціальні рівняння не можуть бути виражені лінійними функціями узагальнених координат, які характеризують зв'язок руху механізмів підвіски і коливання корпусу машини, або їх швидкостей.

У роботі [20] запропонована удосконалена комплексна функціональна математична модель динаміки системи «бойовий модуль – корпус – підвіска». Основним новим компонентом цієї моделі є те, що, на відміну від традиційних, в ній закладена можливість відображення параметричних залежностей коефіцієнтів системи алгебро-диференціальних рівнянь від узагальнених параметрів підвіски ЛБМ. У результаті опосередковано реалізується параметрична залежність динамічних змінних системи від вибору значущих параметрів.

У роботі [3] розглянута параметрична і структурна оптимізація і синтез нових фізичних принципів дії вузлів СП гусеничних і колісних машин.

У роботі [21] запропонована математична модель для дослідження напружено-деформованого стану (НДС) корпусів ЛБМ, які піддані дії зусиль стрільби. Вона відрізняється від математичних моделей, які були запропоновані раніше, тим, що має строгу постановку задачі обґрунтування проектних рішень на основі аналізу результатів моделювання НДС корпусу ЛБМ в процесі стрільби і цілеспрямованого варіювання деякої множини проектних параметрів, також має строгу постановку задачі аналізу міцнісних і жорсткісних характеристик при періодичних імпульсних навантаженнях. Але ця модель також потребує подальшого розвитку.

У роботі [22] зазначається, що при створенні математичних моделей динамічних процесів у ЛБМ слід враховувати, що вони можуть бути подані у вигляді сукупності двох компонент: континуальної та дискретної. Перша з них може бути використана для моделювання корпусу ЛБМ, друга – для моделювання бойового модуля, підвіски і коліс. Такі моделі дають змогу розв'язувати задачу аналізу динамічних процесів у корпусах ЛБМ. У результаті поєднання методу скінченних елементів та методу узагальненого параметричного моделювання розроблена концепція створення множини параметричних моделей динамічних процесів у корпусах ЛБМ [22].

У роботі [4] представлені моделі та методи досліджень, які дають можливість розробляти рекомендації стосовно проектних рішень при проектуванні систем підресорювання транспортних засобів. Зазначається, що традиційні методики досліджень [23] в основному аналізують НДС стебла торсіонного вала. Сучасні профільні публікації,

хоча й використовують удосконалені розрахункові схеми у поєднанні з методом скінченних елементів, також аналізують стебло торсіонного вала. У цій роботі розв'язується задача удосконалення підходів, моделей та методів дослідження НДС торсіонного вала з урахуванням пружно-пластичного деформування у всьому тілі вала. За базовий було прийнято узагальнений параметричний підхід із використанням методів теорії варіаційних нерівностей, пружно-пластичного деформування та методу скінченних елементів. Розглянута модель є параметричною. У подальшому створені авторами розробки планується застосовувати до досліджень НДС торсіонних валів систем підресорювання транспортних засобів спеціального призначення.

Відзначаючи значні досягнення у напрямку удосконалення технічних рішень елементів систем підресорювання ЛБМ та методів дослідження процесів і станів, які в них реалізуються, слід зазначити, що існує низка проблем, які дотепер не знайшли свого вирішення. Це стосується, у першу чергу, відсутності глибокого системного підходу, який охоплює усі сторони процесу обґрунтування прогресивних технічних рішень цих елементів від формулювання математичних моделей процесів і станів у них до синтезу структури і параметрів. При цьому встановлено, що існуючі математичні моделі процесів і станів у багатьох випадках є або необґрунтовано спрощеними, або занадто громіздкими. Важливою обставиною є те, що і задачі аналізу, і задачі синтезу не об'єднані єдиним узагальненим параметричним описом, який би охоплював і технічні рішення елементів СП ЛБМ, і режими руху цих машин, і властивості матеріалів досліджуваних елементів, і вимоги до ТТХ ЛБМ у цілому. Отже, потрібні розробки, які враховують технічні рішення, процеси і стани, етапи виготовлення, умови експлуатації та бойового застосування, тобто такі, що відображають усі етапи життєвого циклу елементів СП ЛБМ.

Висновки. Підбиваючи підсумки аналізу літературних джерел, викреслюється наступна актуальна проблема – розробка теоретичних основ синтезу елементів систем підресорювання бронемашин легкої категорії за масою з метою поліпшення тактико-технічних характеристик сучасних вітчизняних легких броньованих машин.

Для виконання поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1. Здійснити поглиблений аналіз існуючих моделей динамічних процесів в системах підресорювання легких броньованих машин.
2. Здійснити аналіз існуючих прогресивних технічних рішень.
3. Здійснити поглиблений аналіз напружено-деформованого стану торсіонних валів.
4. Проаналізувати існуючі методи синтезу та оптимізації.
5. Розробити новий підхід до синтезу елементів систем підресорювання легких броньованих машин.
6. Удосконалити комплексну математичну модель динамічних процесів елементів систем під-

ресорювання легких броньованих машин.

7. Здійснити чисельну реалізацію вдосконаленої математичної моделі.

8. Здійснити комп'ютерне моделювання і розробити рекомендації із його застосування.

9. Запропонувати нові технічні рішення елементів систем підресорювання із поліпшеними характеристиками.

10. Запропоновані методи синтезу об'єднати в комплексну систему автоматизованого моделювання елементів систем підресорювання та синтезу їх прогресивних технічних рішень.

Список літератури

1. Бруль С.Т., Н.А. Ткачук, А.Ю. Васильев, И.Н. Карапейчик. Моделирование физико-механических процессов в корпусах легкобронированных машин: подходы, модели, эффекты. *Механика та машинобудування*. 2011. № 1. С. 66–73.
2. Скрипниченко Д.А. Расчетно-экспериментальное определение предельных режимов движения многоцелевой мобильной гусеничной платформы. *Диссер. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук*. 05.02.02 – машиноведение, системы приводов и детали машин. Омск. гос. техн. универс., 2016.
3. Душенко В.В. *Системи підресорювання військових і колісних машин: розрахунок та синтез: навч. посібник*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. 336 с.
4. Грабовський А.В., М.М. Ткачук, А.В. Заворотній, С.В. Куценко, М.С. Саверська, І.Є. Клочков, М.А. Ткачук, О.І. Зінченко, Р.П. Деревянкін. Контактна взаємодія торсіонного вала із шліцевою втулкою при напружено-пластичних деформаціях. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2021. № 1. С. 34–46.
5. Shui-Ting Zhou, Yi-Jui Chiu and I-Hsiang Lin. The parameters optimizing design of double suspension arm torsion bar in the electric sight-seeing car by random vibration analyzing method. *Shok and Vibration*, vol. 2017(22), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/8153756>.
6. Wang R.L., J.Z. Zhao, G.Y. Wang, X.K. Chen and L. Li. Modeling and kinematics simulation analyze of conventional suspension with double trailing arms for light off-road vehicles, *Applied Mechanics and Material*, 2013, vol. 312, pp. 673–678
7. Tian G., Y. Zhang, J.-H. Liu and X.-J. Shao. Double wishbone independent suspension parameter optimization and simulation, *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 574, pp. 109–113
8. Cherian V., I. Haque, Jalili N. Development of a non-linear model of a double wishbone suspension for the characterization of force transmission to the steering column and chassis. *Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE*, pp. 775-780, Anaheim, Ca, USA, November 2004.
9. Mohamad N., Farhang K. A vibration model of a suspension – Tire system. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 2B, pp. 1465-1476. Salt Lake City, Utah, USA, 2004.
10. Balike K. P., Rakheja S., Stiharu I. Development of kineto-dynamic quarter-car model for synthesis of a double wishbone suspension. *Vehicle System Dynamics*, 2011, vol. 49, no. 1–2, pp. 107–128.
11. Zhao L., S. Zheng, J. Feng and Q. Hong. Dynamic structure optimization design of lower control arm based on ESL. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2012, vol. 4, no. 22, pp. 4871–4878.
12. Душенко В.В., С.М. Воронцов, Р.А. Нанівський. Дослідження втрат енергії у гідроамортизаторах підвіски бронетранспортера БТР-4 та оцінка доцільності застосування системи її рекуперації. *Військово-технічний збірник Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного*. 2020. № 23. С. 40–49.
13. Сокіл Б.І., Р.А. Нанівський, Грубель М.Г. Власні вертикальні коливання корпусу автомобіля з урахуванням нелінійних характеристик пружної підвіски. *Автомобільний транспорт: науково-вироб. журнал*. 2013. № 5 (235). С. 15–18.

14. Грубель М.Г., О.П. Красюк, М.Б. Сокіл, Нанівський Р.А. Вертикальні коливання підресореної частини колісних транспортних засобів під дією випадкових збурень. *Наукові нотатки: Зб. наук. пр.*; Луцький національний технічний ун-т, Луцьк. 2014. Вип. 46. С. 112–116.
15. Грубель М.Г., Р.А. Нанівський, Сокіл М.Б. Резонансні коливання підресореної частини колісних транспортних засобів під час руху вздовж впорядкованої системи нерівностей. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 1. С. 155–161.
16. Ткачук П.П., М.Г. Грубель М.Б. Сокіл, Нанівський Р.А. Оцінка впливу нелінійних силових характеристик підвіски на ефективність ведення вогню бойових колісних машин. *Військово-технічний збірник Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного*. 2016. № 15. С. 42–47.
17. Малакей А.Н. Математическая модель динамических процессов в корпусе и ходовой системе легкобронированной колесной боевой машины. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2005. № 60. С. 98–120.
18. Агейкин Я.С. *Вездеходные колесные и комбинированные движители*. М: Машиностроение, 1972. 184 с.
19. Александров Е.Е., Воронцов С.Н., Карпенко В.А. и др. Математическое моделирование на ЭВМ случайного микропрофиля дороги. *Вестник ХПИУ*. 1999. Вып. 60. С. 36–39.
20. Мельник Б.А., А.Н. Малакей, Д.С. Мухин, А.Ю. Танченко, Кохановская О.В. Математическое и численное моделирование динамических процессов в элементах легкобронированных боевых машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2013. № 1(975). С. 93–117.
21. Набоков А.В., Ткачук Н.А., Малакей А.Н., Грабовський А.В., Васильев А.Ю., Куценко С.В., Танченко А.Ю., Ананьин Е.С. Математическое моделирование динамических процессов в корпусе легкобронированной машины при импульсном воздействии. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2018. №7(1283). С. 76–85.
22. Ткачук М.А., А.В. Набоков, А.В. Грабовський, О.М. Рікунов, М.М. Ткачук, С.І. Марусенко, І.Я. Храмова, О.В. Кохановська, М.В. Прокопенко, О.С. Лозний, Чала Ю.С. Аналіз реакції тестових просторових конструкцій корпусів легкоброньованих машинна дію серії імпульсів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. Харків, НТУ «ХПІ». 2020. №2. С. 117–139.
23. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник*. Москва: Машиностроение, 1985. 224 с.

References (transliterated):

1. Brul' S.T., N.A. Tkachuk, A. Ju. Vasil'ev, I.N. Karapejchik. Modelirovaniye fiziko-mehaniicheskikh protsesov v korpusah legkobronirovannih machin: podhody, modeli, efekty/S.T. Brul' i dr.]. *Mehanika ta mashinobuduвання*. 2011, no. 1, pp. 66–73.
2. Skripnichenko D.A.. Raschetno-eksperimental'noe opredelenie predel'nyh rezhymov dvizheniya mnogotsel'evoy mobil'noy gusenichnoy platformy. *Disser. nasoiiskaniyeuch. step. kand. tekh. nauk*. 05.02.02 – mashinovedeniye, sistemyprivodov i detaly mashin. Omsk. gos. tekhn. Universitet, 2016.
3. Duschenko V. V. *Systemy pidresorjuvannya vijs'kovykh i kolisnykh mahin: rozrahunok ta syntezy: navch. Posibnyk*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. 336 p.
4. Grabovskiy A.V., M.M. Tkachuk N.A., A.V. Zavorotniy, S.V. Kutsenko, M. S. Saverska, I.E. Klochkov, M.A. Tkachuk, O.I. Zinchenko, Derevyankin R.P. Kontaktna vzayemodiya torsionnogo vala iz shlitsevoyu vtulkoyu pry napruzhenno-plastychnykh deformatsiyakh. *Visnik Natsional'nogo Tehnichnogo Universitetu «Kharkivskiy Politehnicniy Instiut»*. Seriya: *Mashynoznavstvo ta SAPR*. Kharkiv, NTU «KhPI». 2021, no. 1, pp. 34–46.
5. Shui-Ting Zhou, Yi-Jui Chiu and I-Hsiang Lin. The parameters optimizing design of double suspension arm torsion bar in the electric sight-seeing car by random vibration analyzing method. *Shok and Vibration*, vol. 2017(22), pp. 1–9 <https://doi.org/10.1155/2017/8153756>.
6. Wang R.L., J.Z. Zhao, G.Y. Wang, X.K. Chen and L. Li. Modeling and kinematics simulation analyze of conventional suspen-

- sion with double trailing arms for light off-road vehicles, *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 312, pp. 673–678.
7. Tian G., Y. Zhang, J.-H. Liu and X.-J. Shao. Double wishbone independent suspension parameter optimization and simulation, *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 574, pp.109–113
 8. Cherian V., I. Haque and N. Jalili. Development of a non-linear model of a double wishbone suspension for the characterization of force transmission to the steering column and chassis. *Proceedings of the 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE*, pp. 775–780, Anaheim, Ca, USA, November, 2004.
 9. N. Mohamad and K. Farhang. A vibration model of a suspension – Tire system. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, vol. 2B, pp. 1465–1476. Salt Lake City, Utah, USA, 2004.
 10. Balike K. P., S. Rakheja and I. Stiharu. Development of kinetodynamic quarter-car model for synthesis of a double wishbone suspension. *Vehicle System Dynamics*. 2011. vol. 49, no. 1-2, pp. 107–128.
 11. L. Zhao, S. Zheng, J. Feng and Q. Hong. Dynamic structure optimization design of lower control arm based on ESL. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2012, vol. 4, no. 22, pp.4871–4878.
 12. Dushhenko V.V., S. M. Vorontsov, R.A. Naniivskiy. Doslidzhennya vtrata energii u gidromortyzatorah pidvisky bronetransportera BTR-4 ta otsinka dotsil'nosti zastosuvannya system' yirekuperatsii. *Vijskovo-tehnichnyi zbirnyk Natsional'noyi akademii suhoputny'h vijsk imeni get'mana Petra Sagajdachnogo* .2020., no. 23, pp. 40–49.
 13. Sokil B.I., R. A. Naniivskiy, M.G. Grubel' Vlasny verty'kal'ny koly'vannya korpusu avtomobilya zu rahuvanniam nelinejny'h haraktery'styk pruzhnoy pidvisky' *Avtomobil'nyy transport: naukovy' robnichy zhurnal*. 2013, no. 5 (235), pp. 15–18.
 14. Grubel' M.G., O.P. Krasnyuk, M. B. Sokil, Naniivskiy R. A. Verty'kal'ny kolyvannya pidresorenoyi chasty'ny' kolisny'h transportny'h zasobiv pid diyeyu vy'padkovy'h zburen'. *Naukovy notatky': Zb. nauk. pr. : Luts'ky' natsional'ny' y tehnichny' y universitet, Luts'k*. 2014, vol. 46, pp. 112–116.
 15. Grubel' M.G., R. A. Naniivskiy, Sokil M. B. Rezonansny koly'vannya pidresorenoyi chasty'ny' kolisny'h transportny'h zasobiv pid chas ruhu vzdovzh vporyadkovanoyi sy'stemy' nerivnostej. *Visnik Vinny'ts'kogo polytehnichnogo institutu'*. 2015, no. 1, pp. 155–161.
 16. Tkachuk P.P., M.G. Grubel' M.B. Sokil, Naniivskiy R.A. Ocinka vply'vu nelinejny'x sy'lovny'x haraktery'styk pidvisky' na efekty'vnist' vedennya vognu bojovy'x kolisny'x mashyn. *Vijskovo-tehnichny' zbirnyk Nacional'noyi akademii suhoputny'x vijsk imeni get'mana Petra Sagajdachnogo*. 2016, no. 15, pp. 42–47.
 17. Malakej A. N. Matematicheskaya model' dinamicheskikh protsesov v korpusie i hodovoj sisteme legkobronirovannoj kolyesnoj boyevoj mashine. *Visnik Natsional'nogo Tehnichnogo Universitetu «Kharkivskiy Politehnichnyy Institut»*. Seriya: *Mashynoznavatvo ta SAPR*. Kharkiv, NTU «KhPI», 2005, no. 60, pp. 98–120.
 18. Agejkin Ya. S. *Vezdehodniye kolyesniye i kombinirovanny'e dvizhy'teli*. M.: Mashinostroyeniye, 1972. 184 p.
 19. Aleksandrova E.E., Vorontsov S.N., Karpenko V.A. i dr. Matematicheskoye modelirovaniye na EVM sluchajnoho mikroprofilya dorogi. *Vestnik KhGPU*. 1999, vol. 60, pp. 36–39.
 20. Mel'nik B.A., A. N. Malakej, D. S. Muhin, A. Ju. Tanchenko, Kohanovskaja O.V. Matematicheskoe i chislennoe modelirovaniye dinamicheskikh protsesov v elementah legkobronirovanny'h boyevy'x mashin. *Visnik Natsional'nogo Tehnichnogo Universitetu «Kharkivskiy Politehnichnyy Institut»*. Seriya: *Mashynoznavatvo ta SAPR*. Kharkiv, NTU «KhPI», 2013, no. 1(975), pp. 93–117.
 21. Nabokov A.V., Tkachuk N.A., Malakej A.N., Grabovskiy A.V., Vasil'ev A.Yu., Kuczenko S.V., Tanchenko A. Yu., Ana'n'in E.S. Matematicheskoe modelirovaniye dinamicheskikh protsesov v korpusie legkobronirovannoj mashiny' pri impul'snom vozdejstvii. *Visnik Natsional'nogo Tehnichnogo Universitetu «Kharkivskiy Politehnichnyy Institut»*. Seriya: *Mashynoznavatvo ta SAPR*. Kharkiv, NTU «KhPI», 2018, no. 7(1283), pp. 76–85.
 22. Tkachuk M.A., A.V. Nabokov, A.V. Grabovskiy, O.M. Rikunov, M.M. Tkachuk, S.I. Marusenko, I.Ya. Xramczova, O.V. Koxanovska, M.V. Prokopenko, O.S. L'oznyj, Chala Yu.S. Analiz reakciiy testovy'x prostorovy'x konstrukcij korpusiv legkobronirovanny'x mashyn na diyu seriyi impul'siv. *Visnik Natsional'nogo Tehnichnogo Universitetu «Kharkivskiy Politehnichnyy Institut»*. Seriya: *Mashynoznavatvo ta SAPR*. Kharkiv, NTU «KhPI», 2020, no. 2, pp. 117–139.
 23. Kogajev V.P., Mahutov N.A., Gusenkov A.P. *Raschety' detaley mashinikonstruktsijnaprochnost' Idolgovechnost': Spravochnik*. Moskva: Mashinostroyeniye, 1985. 224 p.

Надійшла (received) 11.09.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зінченко Олена Іванівна (Zinchenko Elena Ivanovna, Zinchenko Olena) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», ORCID:<http://orcid.org/0000-0003-2961-5861>; e-mail: zinchenko.zinchenko@gmail.com