

**Поліщук Л. К.**

д.т.н, професор

Слабкий А.В.

к.т.н, доцент

Кудраш В.О.

аспірант

Ляховченко С.С.

аспірант

**Вінницький національний
технічний університет****Polishchuk L.**

Doctor of science, Professor

Slabkiy A.Candidate of Technical Sciences ,
Associate Professor**Kudrash V.**

postgraduate

Liakhovchenko S.

postgraduate

**Vinnitsia National
Technical University****УДК 629.3.027.3****DOI: 10.37128/2306-8744-2023-3-9**

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ РЕКУПЕРАТИВНИХ АМОРТИЗАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Теоретичне дослідження присвячено удосконаленню існуючих конструкцій амортизаторів, які забезпечують рекуперацію механічної енергії в електричну з подальшим корисним використанням. Насамперед був виконаний аналіз застосування різних, за типом приводу, амортизаторів. Встановлено переваги та недоліки кожного із них згідно критеріальних параметрів надійності, технологічності та експлуатації.

Запропоновано уточнену класифікацію амортизаторів за типом кінематичного зв'язку та конструктивним виконанням. Згідно запропонованої класифікації визначено раціональний тип приводу для створення нових зразків рекуперативних амортизаторів – гідравлічний. Згідно розроблених рекомендацій щодо вибору типу приводу амортизатора можна обирати тип приводу в залежності бажаного переважаючого технічного показника.

В роботі представлено результати теоретичного дослідження існуючих конструкцій рекуперативних амортизаційних систем. Встановлено, що окрім рекуперації енергії, такі амортизаційні системи забезпечують покращені демпфувально-амортизаційні показники та дозволяють обирати користувачу бажаний режим роботи підвіски. Аналіз існуючих конструкцій рекуперативних амортизаторів свідчить про кращу ефективність систем зі зворотним зв'язком. Такий тип зв'язку забезпечується в більшості випадків шляхом використання електронно-вимірювальних систем з блоком керування, що значно ускладнює та здорожує конструкцію.

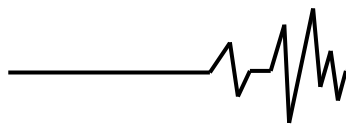
Ґрунтуючись на результатах теоретичного аналізу існуючих конструкцій рекуперативних амортизаторів світових виробників та розробників сформовано технічні та технологічні вимоги до нових конструкцій рекуперативних амортизаторів, які на нашу думку направлені на раціоналізацію та оптимізацію останніх.

Згідно розроблених технічних та технологічних вимог розроблена принципова конструктивна схема рекуперативної амортизаційної системи з гідроклапанами покращення якісних параметрів. Описано принцип роботи клапана якості з профільованим вікном золотника

Ключові слова: амортизатор, рекуперація, система, аналіз, конструкція, привод, експлуатація

Вступ. Підвищення техніко-економічних показників техніки є одним із основних напрямів розвитку сучасних машин. Досвід експлуатації транспортних засобів свідчить про необхідність подальшого розвитку досліджень по розробці та модернізації амортизаційних та демпфуючих систем, який варто, на нашу думку, цілеспрямовано розподіляти в залежності від конкретних вимог експлуатації та необхідних

якісних показників виробу – безвідмовності, ремонтпридатності, збереженості, енергоефективності, ступеню комфортності. Широке різноманіття досліджень з розробки нових конструкцій амортизаторів підтверджує актуальність теми роботи і не вирішення цілого ряду технічних проблем зі створення та експлуатації амортизаторів [1 – 3].



Постановка проблеми. Аналізуючи результати досліджень та досвіду експлуатації [2–3] доцільно вибір конструктивної схеми виконувати

в залежності від бажаного переважаючого показника (див. рис.1).

Показник	Тип приводу			
	Механічний	Гідравлічний	Гідропневматичний	Електродинамічний
Збереженість	●			
Довговічність		●		●
Безвідмовність		●		
Ремонтпридатність	●			
Ефективність роботи			●	●
Компактність		●		
Собівартість	●			
Простота конструкції	●			●
Стійкість до перенавантажень		●		●

Рис. 1. Результати аналізу переваг амортизаторів в залежності від типу приводу

Очевидно з рисунку 1, що переважаючі більшість якісних показників забезпечують два типу конструкцій амортизаторів – механічний та гідравлічний. Це пояснюється специфікою інших

типів конструктивних виконань амортизаторів (див. рис. 2). На рис. 2 зображено уточнену класифікацію амортизаторів за типом приводу та конструктивним виконанням.



Рис. 2. Класифікація амортизаторів

Аналізуючи дану класифікацію з результатами, які представлені на рисунку 1, можна стверджувати, що раціонально будувати нові конструкції амортизаторів на базі гідравлічного приводу, який забезпечує динамічний тип зв'язку. Такий тип зв'язку в віброударній конструкції [4] найкраще забезпечує безвідмовний режим роботи в екстремальних умовах.

Вище наведені результати аналізу досліджень амортизаційних систем свідчить про доцільність створення нових зразків рекуперативних амортизаторів на базі гідравлічного приводу.

Відомо, що для автомобілів, що рухаються бездоріжжям, на коливання автомобіля витрачається до 15 % палива, енергія якого розсіюється через основні елементи підвіски у формі тепла в навколишнє середовище. У зв'язку з постійним зростанням вимог до екологічності та паливної економічності автомобіля, завдання з рекуперації енергії в його підвісці є актуальним [5–7].

Вітчизняними та зарубіжними розробниками та винахідниками запропоновано величезну кількість різноманітних за конструкцією та типом механізмів рекуперації енергії в підвісках автомобілів. У більшості випадків вони



поділяються на електричні, гідравлічні і пневматичні та інерційно-механічні [8–10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Група студентів з Массачусетського Технологічного Інституту розробила конструкцію амортизатора, який, використовуючи енергію, що передається підвісці під час руху автомобіля від нерівностей дорожнього покриття, виробляє електроенергію та ефективніше гасить удари на відміну від традиційних амортизаторів (рисунок 3). В конструкції нового типу амортизаторів використовується гідросистема, в якій рідина при ході підвіски проходить крізь отвори демпфера, приводячи в дію турбіну, з'єднану з генератором електричного струму. Для керування роботою цього амортизатора використовується спеціалізований мікропроцесорний блок керування, який дозволяє оптимізувати режими демпфування, забезпечуючи більш плавну амортизацію руху автомобіля та виробляючи електроенергію, яка може використовуватися для заряджання батарей, або живлення електричною енергією електрообладнання [11].



Рис. 3. Конструктивна схема амортизатора

Схема HERSA описана на рис. 4. Конструкція складається з трьох основних компонентів: механічної частини, гідравлічного приводу та електрогенеруючої частини. Конструкція поршня відрізняється від традиційних поршнів гідроамортизаторів. Клапан відскоку та стиснення винесені в окремий блок, і лише перепускний і компенсацій клапани зберігаються в поршні та нижньому клапані відповідно. Крім того, шток поршня порожнистий, щоб рідина могла перетікати до рекуперативної частини. Гідравлічний двигун з'єднаний з генератором через муфту. Під час такту відбою робоча рідина зі штокової порожнини перетікає до порожнистого поршневого штока, по трубопроводу до гідравлічного насоса, тече через гідравлічний двигун до гідроаккумулятора та проходячи через клапан, і потрапляє у поршневу камеру. На ході відбою відбувається відбір більшої частини енергії [12].

Під час такту стиснення через малий тиск більша частина рідини протікає через перепускний клапан із поршневої камери в штокову далі верхня камера заповнюється робочою рідиною. Між верхньою та нижньою камерами є різниця в об'ємі через наявність штока поршня. Саме через різницю в об'ємі залишкова робоча рідина в нижній камері буде протікати через порожнистий шток до регенеративної частини. Оскільки об'єм поршневого штоку невеликий, об'єм робочої рідини, що надходить у гідравлічний двигун, також малий, тому кількість рекуперованої енергії на ході стиснення значно менше.

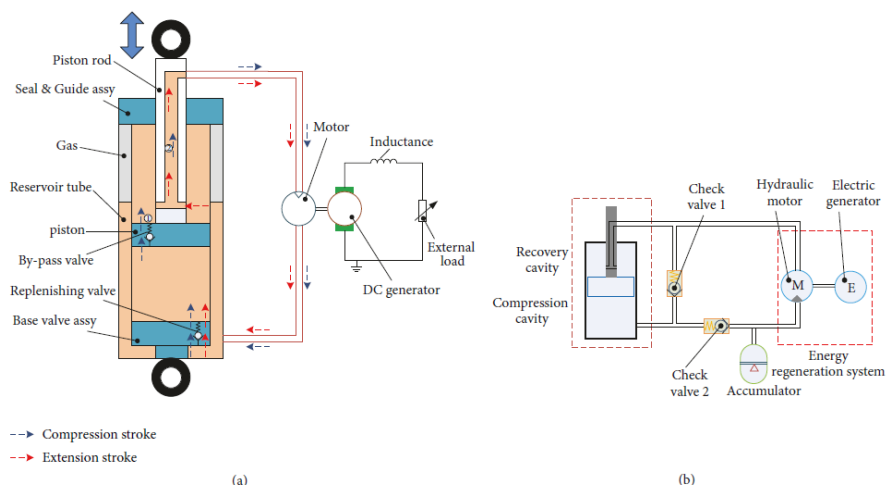
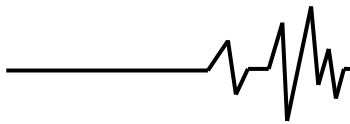


Рис. 4. Гідравлічна схема рекуперативного амортизатора HERSA



У роботі [13] наведена гідропневматична рекуперативна система підвіски. Вона складається з трьох основних компонентів: циліндра, гідропневматичного акумулятора та гідравлічної рідини. Коли амортизатор зазнає зовнішнього впливу від нерівностей дороги, це зусилля призводить до збільшення гідравлічного тиску всередині амортизатора та стиснення газу всередині акумуляторів (рисунок 5).

Компоненти, що використовуються для збору енергії, включають гідравлічний двигун, електромагнітний генератор, гідравлічний розподільник і зовнішній навантажувальний резистор. Основна функція гідравлічного регулятора підтримувати обертання гідравлічного двигуна в одному напрямку під час стиснення.

У статті [14] представлена гідравлічна схема роботи рекуперативного амортизатора, що складається з гідравлічного циліндра подвійної дії, гідророзподільник виконаного у вигляді чотирьох зворотних клапанів, гідравлічного акумулятора, гідравлічного двигуна, генератора, трубопроводів та гідробака (рис. 6). Головним елементом системи є гідравлічний циліндр, який є традиційним амортизатором. Кінець корпусу амортизатора прикріплений до нерухої рами, а шток поршня з'єднаний із гідравлічним приводом. Гідравлічна рідина як при стисканні, так і при розрядженні проходить через гідравлічний двигун в одному напрямку. Гідравлічний двигун

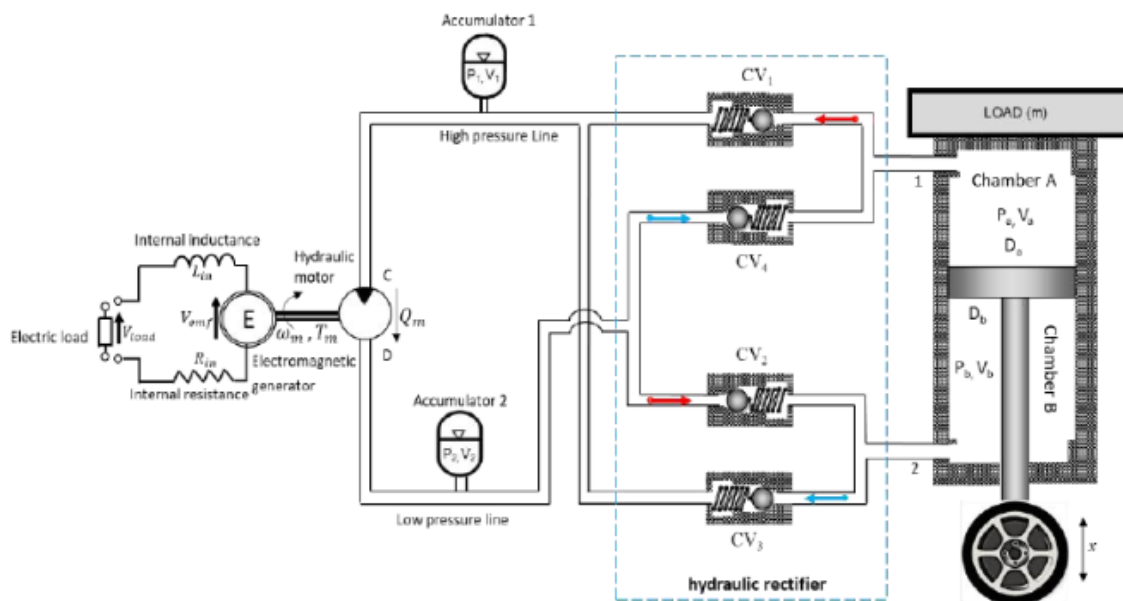


Рис. 5. Схема гідропневматичної рекуперативної підвіски

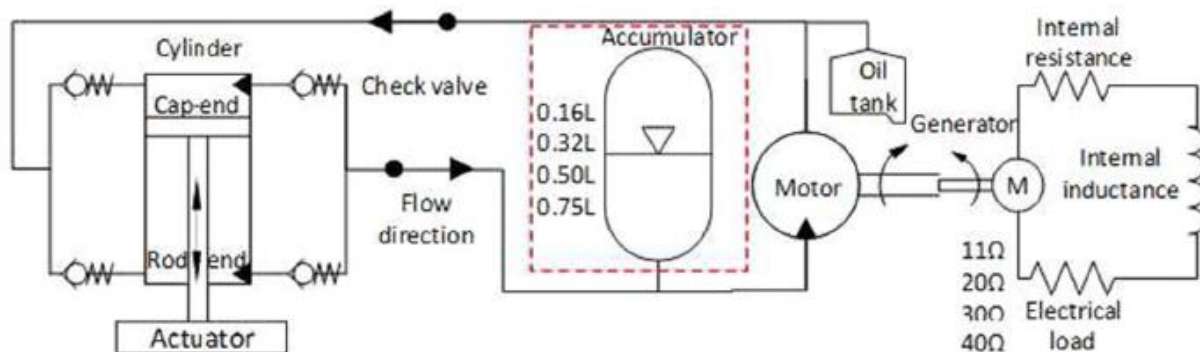


Рис. 6. Гідравлічна схема роботи рекуперативного амортизатора

безпосередньо з'єднаний із генератором через вал. Гідравлічний двигун перетворює лінійний рух поршня у обертальний рух, який приводить у дію генератор для виробництва електрики.

Розроблена рекуперативна підвіска, призначена для позашляхових транспортних засобів [15], що містить поршень 25 що розділяє циліндр 22 на надпоршневу 24 і підпоршневу 25 камери, два гідравлічні контури



20, зворотній клапан 45, що пов'язаний через контур з гідравлічним насосом 36 і надпоршневою камерою, запобіжний клапан, два пневмогідравлічні акумулятори 54 та 60, електронний блок управління, гідробак 38 (рис. 7). Гідравлічна система працює або в режимі рекуперації, або в режимі подвійної дії в залежності від тиску в циліндрах. Зміна маси вантажу, що діє на передню чи задню частину транспортного засобу, призводить до того, що

передня частина транспортного засобу опускається або піднімається щодо коліс.

При наїзді передніми колесами на перешкоду штоки передніх циліндрів втягуються, а задніх витягуються, переміщуючи вгору або вниз поршні і (або) видавлюють гідравлічну рідину з поршневих камер на другий пневмогідравлічний акумулятор, або споживають гідравлічну енергію з першого пневмогідравлічного акумулятора.

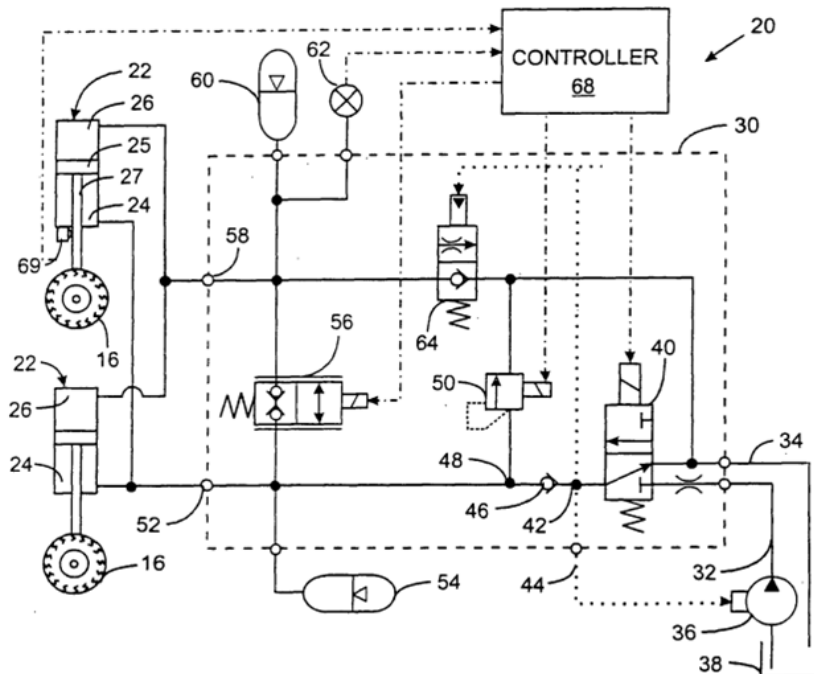


Рис. 7. Гідравлічна схема рекуперативної підвіски транспортного засобу по патенту EP1277604

Гідравлічна інтегрована взаємопов'язана регенеративна підвіска (HIIRS) [16], складається з двохходового гідроциліндра, встановленого між колесом і кузовом, гідропроводу, що з'єднує гідроциліндри, двох гідроакумуляторів, високого та низького тиску, двох гідравлічних розподільників і гідромотор-генераторної установки. Його принципова гідрокінематична схема представлено на (рис. 8). Гідравлічний розподільник, що складається з чотирьох зворотних клапанів, забезпечує односторонній потік рідини для приводу гідравлічного двигуна. На вході гідромотора є акумулятор високого тиску, який може стабілізувати потік рідини через гідромотор. Завдяки цьому гідравлічний двигун підтримує стабільну швидкість, а генератор ефективно виробляє електроенергію. Акумулятор низького тиску на виході може компенсувати коливання об'єму рідини в системі HIIRS. Через нього протікає рідина під високим тиском від гідроакумулятора високого тиску, і таким чином,

коли акумулятор високого тиску працює, це забезпечує додаткову жорсткість підвіски.

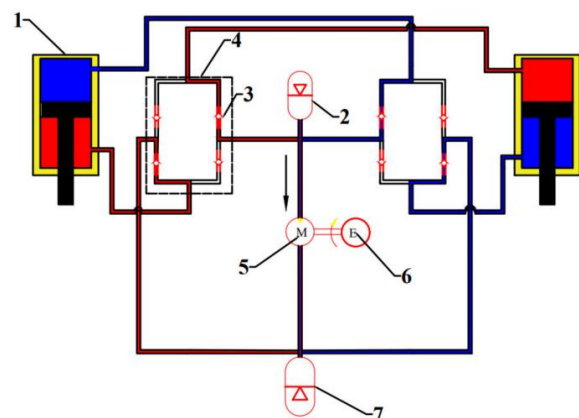
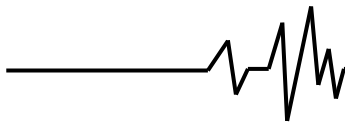


Рис. 8. Принципова гідрокінематична схема системи гідравлічної інтегрованої взаємопов'язаної регенеративної підвіски (HIIRS) [16]



Механіко-електро-гідролічна система підвіски може застосовуватись в важкій колісній та гусеничній техніці і складається з пружних елементів, активного приводу та електричної системи керування. Активний привід складається з лопатевого демпфера, гідролічного комутатора, гідролічного двигуна, генератора. Даний тип підвіски забезпечує активне, або напівактивне зменшення енергії вібрації, і це дозволяє реалізувати рекуперацію енергії, також захищає від ударних перевантажень в усіх режимах роботи. Принципова схема такої підвіски показана на (рисунку 9). Під час руху транспортного засобу колесо візка змушує коліно балансира неодноразово хитатися, приводячи в дію лопатевий демпфер. Лопатевий демпфер перетворює механічну енергію, що надходить від балансирного коліна, у гідролічну та перекачує робочу рідину. Енергоносій проходить через гідролічний комутатор і гідролічний регулятор частоти обертання

потрапляючи в гідромотор приводить в рух його ротор, що з'єднаний з ротором генератора через шліцьову з'єднувальну втулку. Генератор перетворює кінетичну енергію ротора в електричну енергію за допомогою електромагнітної дії, і вона використовується для електричних приладів автомобіля або накопичується в акумуляторі транспортного засобу. В активному робочому стані, електрична система керування змушує генератор працювати в режимі двигуна, це дозволяє обертати ротор гідродвигуна, приводячи в дію лопатевий демпфер. У цей час лопатевий демпфер працює як поворотний гідролічний циліндр, що приводить в рух балансишне коліно, рухаючи колесо візка. Система електричного керування може перемикає режими роботи підвіски між пасивним, напівактивним і активним режимами, що дозволяє покращуючи ефективність амортизації та ефективність регенерації [17].

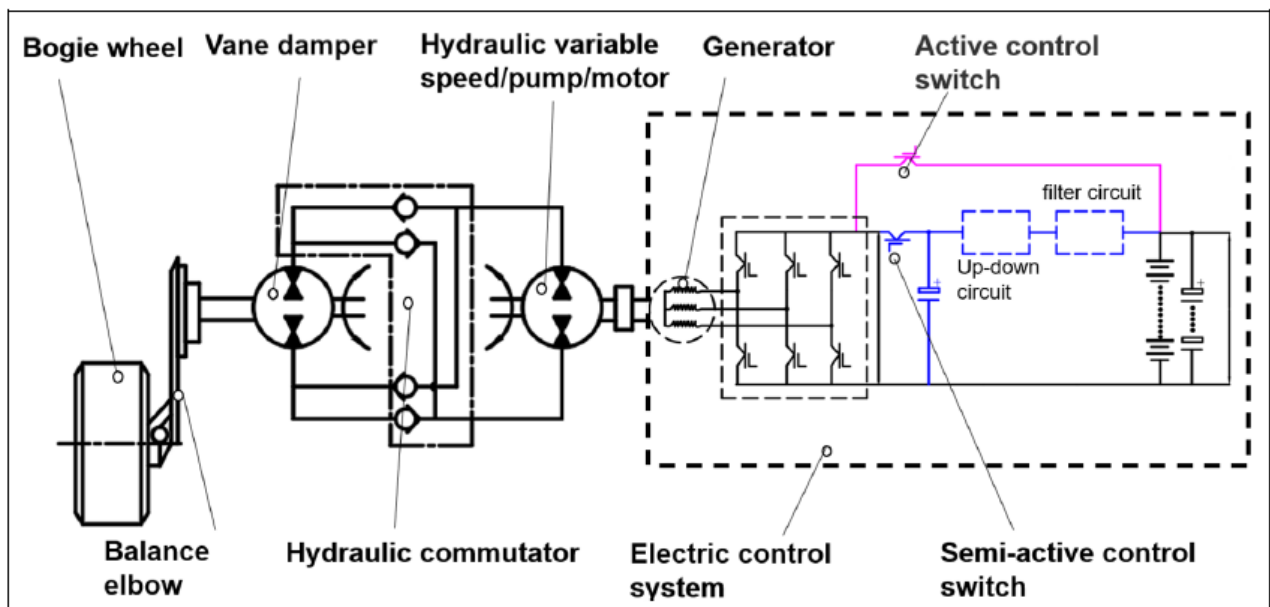


Рис. 9. Принципова схема електрогідролічної підвіски [17]

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз доступних інформаційних джерел, з розробки та експлуатації амортизаторів різноманітних зразків техніки, для уточнення класифікації сучасних амортизаторів і розробки комплексу рекомендацій для застосування амортизаторів в залежності від основних вимог їх експлуатації, зокрема енергоефективних.

Основна частина. Аналізуючи вищенаведені результати теоретичного аналізу досліджень амортизаторних систем та існуючі конструкції рекуперативних амортизаційних систем доцільно сформувати технічні та

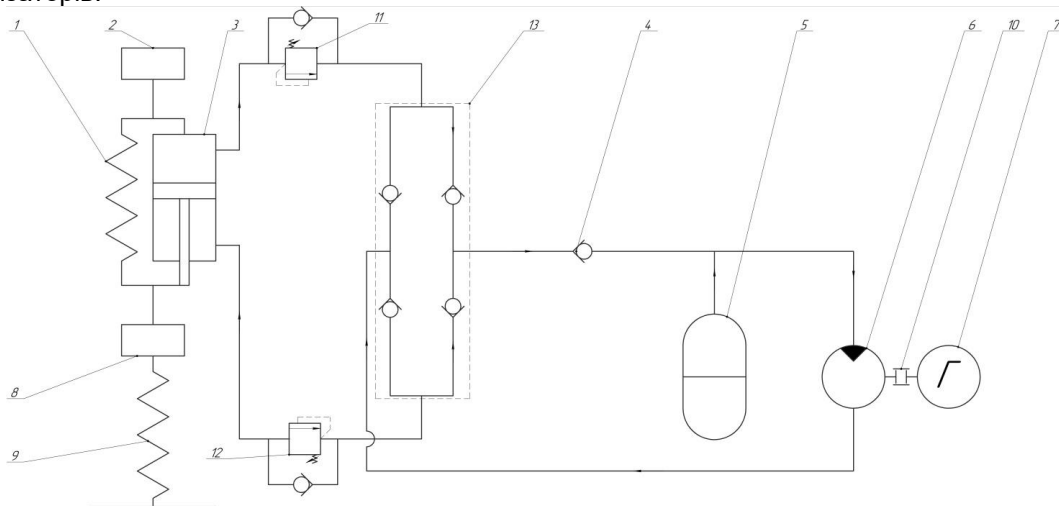
технологічні вимоги до нових конструкцій рекуперативних амортизаторів. На нашу думку основними технічними та технологічними вимогами є такі :

- Використання матеріалів з малою щільністю з метою зменшення невіднесених мас.
- Конструкції системи амортизатора, що відповідають за рекуперацію енергії доцільно розміщати за межами рухомої частини підвіски.
- Тип енергоносія повинен обиратися в залежності від вимог конструкції



- Система рекуперації енергії не повинна впливати на роботоздатність та якість роботи амортизатора.
- Відсутність додаткових джерел енергії.
- Можливість використання стандартизованого матеріалообробного обладнання та інструменту.
- Взаємозамінність елементів конструкції.
- На мобільних машинах використання малогабаритних конструкцій рекуперативних амортизаторів.

Авторами роботи пропонується нова конструктивна схема гідравлічної рекуперативної амортизаційної системи (див. рис. 10) з покращеними експлуатаційними характеристиками завдяки використанню гідроклапанів для регулювання параметрів енергоносія (подачу, тиск) амортизатора з метою забезпечення якісних показників амортизації та демпфування.



1 – пружина підвіски; 2 – підресорені маси; 3 – гідроциліндр; 4 – зворотній клапан; 5 – гідроаккумулятор; 6 – гідромотор; 7 – генератор струму; 8 – невідресорені маси; 9 – пружина еквівалент шини; 10 – зубчаста муфта; 11 – клапан якості ходу стиснення; 12 – клапан якості ходу відбою; 13 – гідророзподільник

Рис. 10. Принципова гідрокінематична схема рекуперативної амортизаційної системи з гідроклапанами покращення якісних параметрів амортизування

Роботу системи можна поділити на хід стиснення та відбою. При роботі підвіски на ходу стиснення шток гідроциліндра 3 рухається вгору перекачуючи енергоносієм по трубопроводу через клапан якості ходу стиснення 11, після чого робоча рідина потрапляє в гідравлічний розподільник 13, що складається з чотирьох зворотних клапанів і забезпечує односторонній потік рідини, приводячи в дію гідромотор 6, вал якого з'єднаний з валом генератора струму 7 за допомогою зубчастої муфти 10, далі робоча рідина знову потрапляє в гідророзподільник 13 і перетікає в штокову порожнину гідроциліндра 3. Під час ходу відбою, при рухові штоку гідроциліндра 3 вниз, робоча рідина перетікає через клапан якості ходу відбою 12 і далі за принципом аналогічним до ходу стиснення тече по контуру в поршневу частину гідроциліндра 3.

Перед гідромотором встановлений гідроаккумулятор 5, що стабілізує потік робочої

рідини, це дозволяє ротору гідромотора 6 обертатись з стабільною швидкістю підвищуючи ефективність роботи генератора струму 7.

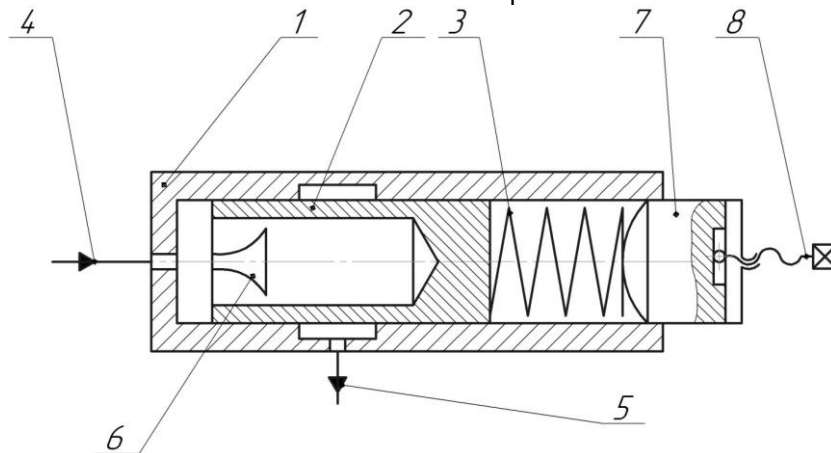
Клапани якості ходу стиснення 11 та відбою 12 мають оригінальну конструкцію та складаються з корпусу в якому виконана циліндрична розточка, в корпусі розміщується стаканоподібний золотник з пружиною. В стаканоподібному золотнику виконаний наскрізний паз складної гометричної форми. Регулювання демпферних характеристик амортизатора на відповідних ходах відбувається за рахунок підбору жорсткості пружини та зміни геометричної форми наскрізного пазу в стаканоподібному золотнику.

Клапани якості ходу 11 і 12 є оригінальними гідроелементами, які забезпечують автоматичне регулювання подачі енергоносія в рекуперативний контур системи без погіршення якісних показників амортизування.



Принципова конструктивна схема клапана якості представлена на рис. 11. Баланс якості роботи амортизатора та рекуперативної системи можна забезпечити завдяки пропорційній площі f відкриття профільованого робочого вікна 6 по відношенню до навантаження, яке сприймає амортизатор під час прямого ходу (стиснення) та зворотного ходів (відбою). Геометричні параметри профільованого вікна золотника передбачається оптимізувати за результатами теоретичних та експериментальних досліджень конструкції клапанів якості рекуперативних амортизаційних систем.

Принцип роботи клапана якості. Енергоносій подається через напірну лінію 4 і починає діяти на торцеві поверхні золотника 2 до наростання до тиску «відкриття» $p_{відкр}$, величина якого встановлюється в залежності від силових параметрів витої пружини 3, що регулюються посередністю опорного штовхача 7 гвинтом регулятора 8. Під час досягнення тиску «відкриття» $p_{відкр}$ відбувається переміщення золотника 8 до моменту з'єднання профільованого вікна 6 золотника з розточкою в корпусі 1 зливною порожниною. Після повного відкриття клапана тиск знижується до тиску «закриття» $p_{закр}$, – відбувається зворотний хід золотника. Далі цикл повторюється.



1 – корпус; 2 – золотник; 3 – вито пружина; 4 – напірна лінія; 5 – зливна лінія; 6 – профільоване вікно золотника; 7 – опорний штовхач регулятора; 8 – гвинт регулятора

Рис. 11. Принципова конструктивна схема клапана якості

Висновок. В роботі виконаний аналіз існуючих конструкцій амортизаційних систем, ґрунтуючись на результатах якого сформовано напрями подальшого удосконалення аналогічних конструкцій та запропоновано оригінальну конструктивну схему рекуперативної амортизаційної системи для рухомих транспортних засобів з покращеними технічними характеристиками.

Список використаних джерел

1. Слабкий А.В., Кудраш О.В. Аналіз вимог до конструкцій підвісок автомобілів підвищеної прохідності / Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13-15 березня 2019 р. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/27325/7781.pdf?sequence=3>
2. Wei C, Jing X (2017) A comprehensive review on vibration energy harvesting: modelling and realization. *Renew Sustain Energy Rev* 74:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073>
3. Khoshnoud F, Zhang Y, Shimura R, Shahba A, Jin G, Pissanidis G, Chen YK, De Silva

CW (2015) Energy regeneration from suspension dynamic modes and self-powered actuation. *IEEE/ASME Trans Mechatron* 20:2513–2524. <https://doi.org/10.1109/tmech.2015.2392551>

4. Обертюх Р. Р. Пристрої для віброточіння на базі гідроімпульсного привода : монографія / Р. Р. Обертюх, А. В. Слабкий. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 164 с.

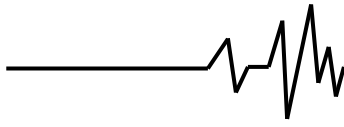
5. Chu S, Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *nature*. 2012;488:294-303.

6. Holmberg K, Andersson P, Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribol Int*. 2012;47:221-34.

7. Fontaras G, Zacharof N-G, Ciuffo B. Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. *Prog Energy Combust*. 2017;60:97-131.

8. Wendel GR, Stecklein GL (1991) A regenerative active suspension system. SAE Publication SP-861, Paper No. 910659

9. Martins I, Esteves M, Silva FPD, Verdelho P (1999) Electromagnetic hybrid active-passive vehicle suspension system. In: *IEEE 49th vehicular technology*



conference (Cat. No. 99CH36363), vol 3. IEEE, Houston, TX, pp 22732–277

10. Zheng X-C (2007) Theoretical and experimental study of automobile electrical energy-regenerative active suspension. Shanghai Jiaotong University, Shanghai

11. MIT students develop energy-harvesting shock absorbers. David L. Chandler, MIT News Office Publication Date: February 9, 2009. <https://news.mit.edu/2009/shock-absorbers-0209>

12. Junyi Zou, Xuexun Guo, Lin Xu, Gangfeng Tan, Chengcai Zhang, Jie Zhang Design, Modeling, and Analysis of a Novel Hydraulic Energy-Regenerative Shock Absorber for Vehicle Suspension. Hindawi Shock and Vibration Volume 2017, Article ID 3186584, 12 pages <https://doi.org/10.1155/2017/3186584>

13. Magdy N., Mohamed Ib. Sokar, Saber A. Rabbo, M. E. El-Arabi Performance Evaluation and Damping Characteristics of Hydro-Pneumatic Regenerative Suspension System // International Journal of Applied Engineering Research, Volume 13, Number 7 (2018). – pp. 5436-5442.

14. Wang R, Gu F, Cattley R, Ball A (2016) Modelling, testing and analysis of a regenerative hydraulic shock absorber system. Energies 9:386. <https://doi.org/10.3390/en9050386>

15. 1277604 EP, МПК В60G 17/04. Dual mode regenerative suspension for an off-road vehicle / Rogala Jeffrey A, Greisbach Eric N ; Husco int inc – № 2254219 ; заявл. 17.06.2002 ; опубл. 22.01.2003.

16. Zou, J.; Guo, X.; Abdelkareem, M.A.A.; Xu, L.; Zhang, J. Modelling and ride analysis of a hydraulic interconnected suspension based on the hydraulic energy regenerative shock absorbers. Mech. Syst. Signal Process. 2019, 127, 345–369. [CrossRef]

17. Chao Wang, Weijie Zhang, Guosheng Wang, Yong Guo. Research on a high power density mechanical-electrical-hydraulic regenerative suspension system for high-speed tracked vehicles. Proc IMechE Part D: J Automobile Engineering 2022, Vol. 236(12) 2711–2724. DOI: 10.1177/09544070211061010

References

1. Slabkyi A.V., Kudrash O.V. *Analiz vymoh do konstruktsii pidvisok avtomobiliv pidvyshchenoi prokhidnosti / Materialy XLVIII naukovo-tekhnichnoi konferentsii pidrozdiliv VNTU, Vinnytsia, 13-15 bereznia 2019 r.* <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/27325/7781.pdf?sequence=3> [in Ukrainian].

2. Wei C, Jing X (2017) A comprehensive review on vibration energy harvesting: modelling and realization. Renew Sustain Energy Rev 74:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.073>. [in English].

3. Khoshnoud F, Zhang Y, Shimura R, Shahba A, Jin G, Pissanidis G, Chen YK, De Silva CW (2015) Energy regeneration from suspension dynamic modes and self-powered actuation. IEEE/ASME Trans Mechatron 20:2513–2524. <https://doi.org/10.1109/tmech.2015.2392551>. [in English].

4. Obertiukh R. R. *Prystroi dlia vibrotochinnia na bazi hidroimpulsnogo pryvoda : monohrafiia / R. R. Obertiukh, A. V. Slabkyi.* – Vinnytsia : VNTU, 2015. – 164 s. [in Ukrainian].

5. Chu S, Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. nature. 2012;488:294-303. [in English].

6. Holmberg K, Andersson P, Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. Tribol Int. 2012;47:221-34. [in English].

7. Fontaras G, Zacharof N-G, Ciuffo B. Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. Prog Energy Combust. 2017;60:97-131. [in English].

8. Wendel GR, Stecklein GL (1991) A regenerative active suspension system. SAE Publication SP-861, Paper No. 910659. [in English].

9. Martins I, Esteves M, Silva FPD, Verdelho P (1999) Electromagnetic hybrid active-passive vehicle suspension system. In: IEEE 49th vehicular technology conference (Cat. No. 99CH36363), vol 3. IEEE, Houston, TX, pp 22732–277. [in English].

10. Zheng X-C (2007) Theoretical and experimental study of automobile electrical energy-regenerative active suspension. Shanghai Jiaotong University, Shanghai. [in English].

11. MIT students develop energy-harvesting shock absorbers. David L. Chandler, MIT News Office Publication Date: February 9, 2009. <https://news.mit.edu/2009/shock-absorbers-0209>. [in English].

12. Junyi Zou, Xuexun Guo, Lin Xu, Gangfeng Tan, Chengcai Zhang, Jie Zhang Design, Modeling, and Analysis of a Novel Hydraulic Energy-Regenerative Shock Absorber for Vehicle Suspension. Hindawi Shock and Vibration Volume 2017, Article ID 3186584, 12 pages <https://doi.org/10.1155/2017/3186584>. [in English].

13. Magdy N., Mohamed Ib. Sokar, Saber A. Rabbo, M. E. El-Arabi Performance Evaluation and Damping Characteristics of Hydro-Pneumatic Regenerative Suspension System // International Journal of Applied Engineering Research, Volume 13, Number 7 (2018). – pp. 5436-5442. [in English].

14. Wang R, Gu F, Cattley R, Ball A (2016) Modelling, testing and analysis of a regenerative hydraulic shock absorber system. Energies 9:386. <https://doi.org/10.3390/en9050386>. [in English].

15. 1277604 EP, МПК В60G 17/04. Dual mode regenerative suspension for an off-road vehicle / Rogala Jeffrey A, Greisbach Eric N ; Husco int inc –



№ 2254219 ; заявл.17.06.2002 ; опубл. 22.01.2003. [in English].

16 Zou, J.; Guo, X.; Abdelkareem, M.A.A.; Xu, L.; Zhang, J. Modelling and ride analysis of a hydraulic interconnected suspension based on the hydraulic energy regenerative shock absorbers. Mech. Syst. Signal Process. 2019, 127, 345–369. [CrossRef]. [in English].

17 Chao Wang, Weijie Zhang, Guosheng Wang, Yong Guo. Research on a high power density mechanical-electrical-hydraulic regenerative suspension system for high-speed tracked vehicles. Proc IMechE Part D:J Automobile Engineering 2022, Vol. 236(12) 2711–2724. DOI: 10.1177/09544070211061010. [in English].

ANALYSIS OF CONSTRUCTIONS OF RECEIVED AMORTIZATION SYSTEMS

The theoretical research is devoted to the improvement of the existing structures of shock absorbers, which ensure the recovery of mechanical energy into electrical energy with further useful use. First of all, an analysis of the use of different shock absorbers by drive type was performed. The advantages and disadvantages of each of them are established according to the criterion parameters of reliability, manufacturability and operation.

A refined classification of shock absorbers by type of kinematic connection and structural design is proposed. According to the proposed classification, the rational type of drive for creating new models of recuperative shock absorbers is determined to be

hydraulic. According to the developed recommendations for choosing the shock absorber drive type, you can choose the drive type depending on the desired prevailing technical indicator.

The paper presents the results of a theoretical study of existing designs of recuperative damping systems. It has been established that, in addition to energy recovery, such damping systems provide improved damping and damping performance and allow the user to choose the desired mode of operation of the suspension. Analysis of existing designs of regenerative shock absorbers indicates better efficiency of systems with feedback. This type of communication is provided in most cases by using electronic measuring systems with a control unit, which greatly complicates and increases the cost of the design.

Based on the results of the theoretical analysis of the existing designs of recuperative shock absorbers of world manufacturers and developers, technical and technological requirements for new designs of recuperative shock absorbers were formed, which, in our opinion, are aimed at rationalization and optimization of the latter.

According to the developed technical and technological requirements, a basic design scheme of a recuperative damping system with hydrovalves for improving quality parameters was developed. The principle of operation of the quality valve with a profiled spool window is described

Key words: shock absorber, recuperation, system, analysis, design, drive, operation.

Відомості про авторів

Поліщук Леонід Клавдійович – доктор технічних наук, звідувач кафедри галузевого машинобудування Вінницького національного технічного університету (21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ауд. 1200, e-mail: leo.polishchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5916-2413>).

Слабкий Андрій Валентинович — кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Вінницького національного технічного університету (21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ауд. 1219, e-mail: Slabkiyandrey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9284-2296>).

Кудраш Віталій Олександрович – аспірант кафедри галузевого машинобудування Вінницького національного технічного університету (21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ауд. 1200, e-mail: lisovoy844@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0380-8120>).

Ляховченко Сергій Сергійович – аспірант кафедри галузевого машинобудування Вінницького національного технічного університету (21021, м. Вінниця, вул. Хмельницьке шосе, 95, ауд. 1200, e-mail: Lyahovchenko@gmail.com)

Leonid Polishchuk– Doctor of science, Professor of department of industrial of Vinnytsia National Technical University (21021, Vinnytsia, Khmelnytskyi highwayst, 95, room 1200, e-mail: leo.polishchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5916-2413>).

Slabkiy Andrii – Candidate of Technical Sciences (Ph. D in Eng.), Associate Professor of department of industrial of Vinnytsia National Technical University (21021, Vinnytsia, Khmelnytskyi highwayst, 95, room 1219, e-mail: Slabkiyandrey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9284-2296>).

Kudrash Vitalii – postgraduate of department of industrial of Vinnytsia National Technical University (21021, Vinnytsia, Khmelnytskyi highwayst, 95, room 1200, e-mail: lisovoy844@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0380-8120>).

Liakhovchenko Serhii, postgraduate of department of industrial of Vinnytsia National Technical University (21021, Vinnytsia, Khmelnytskyi highwayst, 95, room 1200, e-mail: Lyahovchenko@gmail.com)