

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

УДК 631.372-027.45

ПОГОДЖЕНО  
Декан механіко-технологічного факультету

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач кафедри  
технічного сервісу та інженерного  
(назва кафедри)  
Менеджменту ім. М.П.Момотенка

Вячеслав БРАТІШКО  
(підпис) (ім'я, прізвище)

Іван РОГОВСЬКИЙ  
(підпис) (ім'я, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Удосконалення експлуатації амортизаторів з рекуперативним ефектом  
автомобілів при перевезенні сільськогосподарських вантажів»

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»  
(код і назва)

Освітня програма «Автомобільний транспорт»  
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми  
доктор технічних наук, професор  
(науковий ступінь та вчене звання)

Валерій ВОЙТЮК  
(ім'я, прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи  
д.т.н., завідувач каф.  
(науковий ступінь та вчене звання)

Іван РОГОВСЬКИЙ  
(ім'я, прізвище)

Виконав:

Василь ШОСТАЦЬКИЙ  
(ім'я, прізвище)

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технічного сервісу та інженерного менеджменту ім. М.П.Момотенка

д.т.н., проф.

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Іван РОГОВСЬКИЙ

(ім'я, прізвище)

« »

2023 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Василію Володимировичу Шостацькому

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

(код і назва)

Освітня програма «Автомобільний транспорт»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Удосконалення експлуатації амортизаторів з рекуперативним ефектом автомобілів при перевезенні сільськогосподарських вантажів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «30» грудня 2022 р. № 944 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Науково – технічна література; результати науково-дослідних робіт по літературних джерелах з експлуатації амортизаторів з рекуперативним ефектом автомобілів при перевезенні сільськогосподарських вантажів

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз стану питання досліджень, мета, задачі дослідження
2. Теоретичне вивчення впливу експлуатації амортизаторів з рекуперативним ефектом автомобілів при перевезенні сільськогосподарських вантажів
3. Методика розрахунку алгоритму експлуатації амортизаторів з рекуперативним ефектом автомобілів при перевезенні сільськогосподарських вантажів
4. Результати експериментальних досліджень експлуатації амортизаторів з рекуперативним ефектом автомобілів при перевезенні сільськогосподарських вантажів

Перелік графічного матеріалу Електронна презентація на 14 слайдах

Дата видачі завдання «11» листопада 2022 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(підпис)

Іван РОГОВСЬКИЙ

(ім'я прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Василь ШОСТАЦЬКИЙ

(ім'я прізвище)

# НУБІП України

ВСТУП

## 1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ РЕГЕНЕРАТИВНИХ АМОРТИЗАТОРІВ

### ЕФЕКТ

1.1. Вимоги до системи підвіски транспортних засобів сільськогосподарська продукція та трактори..... 16

1.2. Підвісні системи з функцією рекуперації енергії для сільськогосподарські машини та трактори..... 17

1.3. Типи електричних машин, призначених для використання в рамках ARE 29

Висновки за розділом 1..... 37

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ АМОРТИЗАТОР 3

### РЕГЕНЕРАТИВНИМ ЕФЕКТОМ

2.1 Математичний опис процесів у підвісній системі Рух..... 38

2.2 Математичне опис процесів, які у електричних системах. Амортизаторна машина..... 43

Розділ 2. Висновки..... 56

## 3 МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ КОМПЛЕКТ АМОРТИЗАТОРІВ 3 РЕГЕНЕРАТИВНИМ ЕФЕКТОМ

3.1. Методика проведення дослідних випробувань умов праці Амортизатор 58

3.1.1 Цілі та завдання дослідження..... 58

3.1.2 Предмет дослідження..... 59

3.1.3. Процедури та методи випробувань..... 61

3.2. Методика проведення науково-дослідних стендових випробувань..... 63

3.2.1 Цілі та завдання дослідження..... 63

3.2.2. Стенд для дослідження амортизаторів..... 64

3.2.3 Опис конструкції амортизатора, що досліджується..... 68

3.2.4 Вимірювальні та записувальні пристрої..... 72

3.2.5. Процедури та методи стендових випробувань .....	73
3.3 Методика випробувань комплекту амортизаторів з регенеративний ефект в автомобілі .....	74
3.3.1 Цілі та завдання дослідження .....	74
3.3.2 Предмет дослідження .....	75
3.3.3 Вимрювальні та записувальні пристрої .....	85
3.3.4 Процедури та методи випробувань .....	85
Розділ 3. Висновки .....	87
4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ І ТЕСТІВ АМОРТИЗАТОР З РЕГЕНЕРАТИВНИМ ЕФЕКТОМ .....	88
4.1 Аналіз результатів дослідних випробувань умов праці Амортизатор .....	88
4.2 Рекомендації щодо конструкції амортизатора .....	90
4.3 Аналіз результатів стендових випробувань .....	92
4.4 Аналіз результатів дослідницьких випробувань набору Амортизатори як частина автомобіля .....	97
Розділ 4. Висновки .....	103
5 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АМОРТИЗАТОРІВ З РЕКРЕАЦІЙНИЙ ЕФЕКТ З ВИКОРИСТАННЯМ СИМУЛЯЦІЙ МОДЕЛІ .....	104
5.1 Імітаційна модель системи, включаючи ARE .....	104
5.2 Імітаційне моделювання ARE на основі лінійної електрики легкові автомобілі .....	125
5.3 Імітаційне моделювання ARE на основі обертання електрична машина .....	27
5.4 Ефективність використання комплекту ARE у складі автомобіля Сільське господарство та трактори .....	41
5.5 Рекомендації щодо майбутніх напрямів досліджень .....	55
Розділ 5. Висновок .....	56
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ .....	60

# НУБІП України

## ВСТУП

В даний час посилюються вимоги щодо зниження викидів забруднюючих речовин від різних транспортних засобів, у тому числі сільськогосподарської техніки. Автомобілі та трактори є одним із основних

джерел забруднення навколишнього середовища. Нові екологічні стандарти

також є рушійною силою розвитку транспортних та сільськогосподарських технологій, спонукаючи виробників створювати деталі досконалішої конструкції.

Власники також висувають вимоги до конструкції транспортних засобів,

щоб знизити сукупну вартість володіння, тим самим оптимізуючи

транспортні процеси та витрати. Фактор скорочення запасів традиційних

енергоресурсів, що видобуваються, і зростання цін на них також впливає на

зростаючу необхідність підвищення ефективності та оптимізації

транспортних процесів за рахунок зниження витрат на їх реалізацію. Тому

виникає необхідність створення систем та агрегатів, які максимально

ефективно використовують енергетичні ресурси. В автомобілях і тракторах

енергія агрегату, що отримується не тільки за рахунок корисної роботи, а й за

рахунок згоряння палива, втрачається у вигляді втрат у великій кількості

вузлів та агрегатів. Йдеться про трансмісію, підвіску, гальма, шини, рульове

управління і т. д. Втрати енергії можна класифікувати наступним чином:

Втрати на електростанціях (через неякісні робочі процеси, в основному опалення та виділення тепла в навколишнє середовище);

– втрати в силових установках приводу допоміжних агрегатів (привід

генератора, насосів ГУР, пневмокомпресора, компресора кондиціонера,

циркуляційного насоса, вентилятора системи охолодження тощо);

– Втрати в приводах і редукторах, головних і допоміжних приводах,

втрати на тертя в агрегатах, опорах, тепловиділення при роботі

редукторів, прослизання деталей, що труться, нагрівання робочих

рідни;

– Втрати в системах управління, кермової та гальмівної систем, розсіювання енергії у вигляді тепла;

– Втрати в системі підвіски (СС) на деформацію і гасіння вібрації (не менше 10-20% від загальних механічних втрат);

– Втрати на тягу, на деформацію, нагрівання та опір коченню, втрати у вигляді тепла, енергії відриву замкнених обсягів у протекторі шини, енергії ковзання елементів площі плями контакту.

Щоб вирішити ці проблеми, виробники автомобілів і тракторів зараз працюють над розробкою гібридних та електромобілів, що використовують електрохімічні джерела енергії або суперконденсатори. Тому виникає питання про створення поновлюваних пристроїв, що дозволяють акумулювати та зберігати енергію, що виділяється у навколишнє середовище у вигляді втрат.

При русі дорогою автомобіль піддається неминучим вібраціям, характер яких залежить від якості дороги та умов руху. З метою зниження впливу кінематичних впливів на водія, пасажирів, вантаж, агрегати та системи самого автомобіля в системі підвіски застосовуються пружні та демпфуючі елементи. Демпфуючі елементи гасять вібрації за рахунок розсіювання енергії при переході від механічної до теплової. На цей процес також витрачається корисна енергія агрегату. Щоб підвищити енергоефективність систем підвіски транспортних засобів, необхідно рекуперувати, зберігати та розумно використовувати енергію, що виділяється амортизаторами у навколишнє середовище.

Багато виробників та розробників транспортних засобів працюють над системою підвіски на основі енергозберігаючого амортизатора з регенеративним ефектом. Останніми роками спостерігається зростання патентної активності у цій галузі. Найактивнішою країною, в якій проводяться розробки в цій галузі та реєструються винаходи, є Китай. Цій темі також приділяється велика увага в Німеччині, Японії, США та Кореї.

Водночас, провідні автомобільні компанії (Hyundai, Volkswagen, Daimler, Audi, Nissan, Ford, General Motors, Toyota) мають численні запатентовані

розробки в галузі підвісок автомобілів з ефектом рекуперації. Однак розробки в даній час не знайшли практичного застосування та реалізації, головним чином, через їхню складність і високу вартість.

Роботи А. Н. Посметьєва, В. О. Ніконова, А. Н. Сергієнко, В. Б.

Самородова, Б. Любарського присвячені дослідженням у галузі ефективності застосування систем рекуперації енергії в підвісці автомобіля, конструктивному аналізу та вибору конструкції демпфуючого елемента із регенеративним ефектом. Г., Тарасова Є.А., Рябова І.М., Сорокіна А.А.,

Окладнікова Д.Л., Зеєра В.А., Шиліна Б.І., Дудкіна С.А., Бакаєва Т.А. .,

Хамітова Р.М., Копилова С.І., Воробйова В.В., Сичек К., Кучар М. та ін. Дж.

Паулішеса, Е. А. Ломонової, Н. Аман, А. Тонолі, А. Канови, Ф. Каваллі та М. Падовані. Темі розвитку присвячені роботи З. Лей, Т. Сюдуна, З. Лей Шена,

З. Лі, Л. Цзо, Дж. Куанга, Г. Лурса, Е. Мендрелі, Р. Джевоскі та А. Гупти. та

створення конструкцій демпфуючих елементів. А. Енджейчик, М. Малках, Р.

Халл. Роботи З. Чжана, Н. Ченга та К. Ченга присвячені використанню амортизаторів на основі лінійних електрогенераторів у системах підвіски.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Транспортні засоби, що використовуються в аграрному секторі народного господарства, належать до класу комерційних автомобілів. Для цього класу транспортних засобів найголовніше – зниження витрат та підвищення енергоефективності транспортного процесу. Зниження витрат на експлуатацію транспортних засобів позитивно позначиться на зниженні витрат і збільшенні прибутку, а головне, підвищить екологічність товарної продукції, що випускається, і зменшить шкідливий вплив на навколишнє середовище.

Сільськогосподарські машини працюють у різних дорожніх умовах на дорогах з різним мікропрофілем – це асфальтовані дороги гарної та задовільної якості, гравійні дороги, ґрунтові дороги як задовільної, так і розбитої якості, засніжені дороги, умови важкого бездоріжжя тощо. Трактори більшу частину часу їздять ґрунтовими дорогами поганої якості без звичайного твердого покриття. Порядок руху характеризується значними коливаннями, що виникають через кінематичні збурення через нерівності дорожнього покриття і супроводжуються впливами на підресорені та безпружинні маси. Також варто відзначити, що якість доріг, на яких використовуються ці пристрої багато в чому залежить від природних явищ. Сільськогосподарські дороги, якими пересуваються сільськогосподарські машини і трактори, можна охарактеризувати як дороги зі значними висотами та нерівностями різної довжини, що викликають значні вібрації під час руху.

ДЕ, встановлені на сільськогосподарських машинах та тракторах, працюють у важких умовах, оскільки мають забезпечувати гасіння цих вібрацій. Отже, ця функція потребує більш високої частки енергії, ніж дорожні транспортні засоби. І використання систем рекуперації енергії деформації підвіски (СДЕДЕ) при проектуванні систем підвіски сільськогосподарських машин і тракторів, оснащених амортизаторами регенеративної дії (АРЕ) та здатних до рекуперації енергії є найбільш актуальним завданням. Це технічне рішення дозволить підвищити енергоефективність технологічних операцій за рахунок зниження енерговитрат.

Для вирішення цього завдання автор пропонує реалізувати ефект рекуперації механічної енергії коливань підресореної маси автомобіля в



електричну енергію за допомогою електромеханічного перетворювача (генератора) та подальшого використання цієї енергії для живлення споживачів або для заряджання енергії. Джерело використання накопичувача:

батареї високої чи низької напруги за рахунок зниження навантаження на двигун внутрішнього згоряння або батареї суперконденсаторів.

### **Пріоритети досліджень**

Мета роботи – підвищення енергоефективності сільськогосподарських машин за рахунок застосування амортизаторів із регенеративним ефектом для оптимізації технологічних процесів за критеріями економічності та ресурсозбереження, а також підвищення ефективності їх експлуатації.

### **Об'єкт дослідження**

Предметом дослідження є амортизатор з регенеративним ефектом у складі системи рекуперації енергії, деформації підвіски на прикладі електровантажівки КАМАЗ 4308Е.

### **Предмет дослідження**

Предметом дослідження є процеси відновлення втрат енергії у підвісці сільськогосподарської машини під час використання амортизатора з регенеративним ефектом під час руху.

### **Пріоритети досліджень**

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі розробки систем рекуперації, що включають амортизатори з відновленням.
2. Проаналізувати можливості використання електричних машин під час проектування амортизатора з регенеративним ефектом.
3. Розробка методики проведення комплексних досліджень амортизаторів із регенеративним ефектом.
4. Проведення дослідження умов роботи демпфуючих елементів у складі сільськогосподарської машини під час виконання технологічних робіт у рослинництві та тваринництві.
5. Розробка рекомендацій щодо проектування амортизаторів регенеративної дії для сільськогосподарської техніки.
6. Розробка нового принципу досягнення регенеративного ефекту

амортизаторів, що полягає в перетворенні частини енергії механічних коливань в електричну енергію, яка при збереженні властивостей, що демпфують, може бути з користю використана в сільськогосподарському автомобілі та сільськогосподарському тракторі.

7. Дізнайтесь, як працює регенеративний амортизатор в автомобілі.

8. Розробка імітаційної моделі, що дозволяє досліджувати електричні та енергетичні процеси, що відбуваються в амортизаторах з рекуперативним ефектом та перетворювачах потужності в системі рекуперації енергії транспортних засобів під час руху у різних умовах.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

### Методи дослідження

Для вирішення поставлених завдань та досягнення поставленої мети були використані експериментальні методи дослідження роботи демпфуючих елементів та методи моделювання з використанням пакету MatLab.

Дослідження проводилися з використанням стратегії системного аналізу, методу математичного та імітаційного моделювання, математичних методів теоретичної електротехніки, теорії електро механічного перетворення енергії, теорії транспортних засобів та динаміки транспортних засобів. Основні теоретичні положення та висновки підтверджені результатами експериментальних досліджень у лабораторних умовах.

# 1. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ АМОРТИЗАТОРІВ З РЕГЕНЕРАТИВНИМ ЕФЕКТОМ

## 1.1. Вимоги до системи підвіски сільськогосподарських машин та тракторів

Проблеми динаміки колісних транспортних засобів вивчаються з їх появи. Ці питання відображені у роботах Е.А. Чулакова [1], Б.С. Фалькевича [2], А.О. Нікітін [3] та інших.

Система підвіски істотно впливає на такі характеристики автомобіля, як плавність ходу, керованість і стійкість, а також впливає на керованість і цілісність вузлів і конструкцій автомобіля.

СП є складною системою, що складається з ряду пружних, демпфуючих і провідних елементів. Пневматичні шини також істотно впливають на функціонування системи та діють, зокрема, як пружний елемент. Існують транспортні засоби, які не мають окремих пружних елементів, крім пневматичних шин. Пружні елементи (ЕЕ) доглинають масу автомобіля, а також зменшують динамічні навантаження, що передаються на опорну систему за рахунок пружної деформації. Демпфуючі елементи гасять (гасять, гасять) вібрації підресорених і безпружинних частин автомобіля. Напрямні елементи забезпечують передачу навантаження між підресореними і безпружинними частинами і визначають кінематику їх відносного руху [4, 5].

До підвісної системи пред'являються такі основні вимоги [1, 2, 6, 7, 8]:

- Зниження динамічних навантажень, що діють на частини автомобіля, що підвішуються (водій, екіпаж, пасажирів, вантаж);
- Гасіння вібрацій, викликаних рухом підресорених та безпружинних частин;
- Передача сил і моментів між підресореними та безпружинними частинами;
- Забезпечення необхідної кінематики руху коліс, а саме відсутності змін колії та кута встановлення коліс;
- протидіяти розгойдуванню системи підтримки;
- Забезпечує надійний контакт колеса з опорною поверхнею.

Науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи продовжуються, знаходить відображення у вітчизняних та зарубіжних публікаціях та спрямоване на вивчення процесів, що відбуваються в елементах та агрегатах СП, підвищення працездатності як елементів окремо, так і всієї системи в цілому, а також вивчення впливу на загальнотехнічні характеристики транспортного засобу. Це відбито у роботах таких учених, як Ю.М. Певзнер, М.М. Жілейкін, Г.О. Котієв [9, 10, 11, 12], Дж. Реймпель [13, 14], Дж. К. Діксон [15], В. Бауер [16] та багато інших.

У цьому роботі досліджуються вібраційні процеси, що у шарнірах колісних транспортних засобів під час руху. Derzeit ist die Verwendung mathematischer Modellierungsmethoden mithilfe numerischer Simulation auf elektronischen Computern (im Folgenden als Computer bezeichnet) weit verbreitet, wie zahlreiche Veröffentlichungen von Autoren wie VV Tolsky. [17, 18, 19, 20] та інші.

## **1.2. Системи підвіски з функцією рекуперації енергії для сільськогосподарської техніки та тракторів**

Сільськогосподарська техніка експлуатується як на дорогах із суцільним покриттям різної якості, так і на ґрунтових польових дорогах, як головних, так і другорядних. Сільськогосподарську техніку експлуатують також в умовах важкого бездоріжжя: розбиті та розмиті дороги, свіжий сніг тощо. Більшу частину часу сільськогосподарська техніка і трактори пересуваються неякісними сільськогосподарськими ґрунтовими дорогами, для яких характерна наявність нерівних нерівностей, поверхні значної висоти та різної довжини. Якість сільськогосподарських ґрунтових доріг часто залежить від погоди та може погіршуватися. У реальних умовах експлуатації під час руху цими дорогами колесо автомобіля взаємодіє з нерівностями за допомогою тяги і сприймає кінематичні обурення.

Вплив на підвищену частину автомобіля залежить як від характеристик самих джерел (висоти та довжини нерівностей), так і від характеристик та швидкості руху автомобіля. Підвісна частина машини також сприймає силові обурення, які пояснюються недосконалістю ступичного вузла та інших систем та механізмів. Кінематичні збурення є основним фактором, що

впливає на систему підвіски. Інтенсивність цього обурення і вібрації, що виникають в результаті, в основному визначаються мікропрофілем дорожнього покриття, швидкістю руху і властивостями шини [21]. У сільськогосподарських машин інтенсивність обурень і вібрацій, що виникають, істотно вища в порівнянні з дорожніми машинами, які переважно експлуатуються на асфальтованих дорогах з твердим покриттям.

В даний час на сільськогосподарській техніці найчастіше застосовуються залежні підвіски з пружним металевим елементом та гідравлічними телескопічними амортизаторами. Гасіння вібрації підресорених мас автомобіля забезпечується за рахунок перетворення механічної енергії вібраційного процесу на теплову енергію з подальшим викидом у навколишнє середовище. У випадку гідродемпфуючих елементів цей процес відбувається шляхом дроселювання гідравлічного робочого тіла через отвори калібровані в амортизаторі, що супроводжується нагріванням робочого тіла. Тепло, що виходить в результаті, виділяється в навколишнє середовище через зовнішні поверхні амортизатора. Без амортизаторів демпфування відбувається за рахунок розсіювання енергії у вигляді гістерезисних втрат у масі матеріалу шини під час її деформації.

Теплові втрати потужності амортизатора, встановленого на сільськогосподарській вантажівці, можна оцінити за формулою (1) [22, 23]:

$$N_a = k_a v^2; \quad (1)$$

Тут  $k_a$  - середнє значення коефіцієнта демпфування, а  $v$  - швидкість поршня амортизатора, при якій відкриваються запобіжні клапани.

Для амортизаторів, що використовуються на автомобілях КамАЗ,  $v$  зазвичай становить 0,52 м/с, а середній коефіцієнт демпфування - 12200 Н?

$$N_a = 12200 \cdot 0,52^2 = 3,3 \text{ кВт.}$$

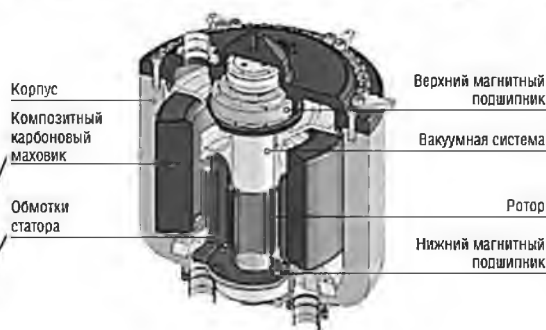
В автомобілях встановлено не менше 4 елементів, що демпфують. У разі тепла енергія становить 13,2 кВт. Ця потужність дуже велика, і використання пристроїв для рекуперації енергії може суттєво вплинути на енергоефективність цих транспортних засобів.

В даний час запропоновано низку конструкцій пристроїв рекуперації

енергії в СЕ [24, 25]. У принципі, всі запропоновані технічні рішення можна застосувати до легкових автомобілів. Загалом їх поділяють такі основні групи [26, 27, 28] (рис. 1.2):

- електричні, електромагнітні;
- гідро- та пневматичні;
- інерційно-механічний;  
Гертля;
- комбінований.

До інерційно-механічних рекуператорів відносяться різні пристрої, що використовують енергію маховиків і акумулюють енергію мас, що повільно обертаються або поступально рухаються. Більше того, перше найбільш імовірно. Цей тип рекуперативних пристроїв знайшов мало застосування конструкції систем приводу провідних коліс автомобілів для рекуперації енергії гальмування. На малюнку 1.1 показано варіанти конструкції інерційного накопичувача. Дослідження показують, що використання цих пристроїв може покращити плавність ходу автомобіля. Крім того, вони прості за конструкцією і можна порівняти за вартістю з пристроями гідравлічного відновлення. Без використання в конструкції електричних машин використання запасеної енергії дуже утруднено і передбачає використання складних систем передачі механічної енергії на приводи або колеса. Нерівномірне функціонування демпфуючих елементів, що супроводжується зміною напрямку руху, не дозволяє використовувати позитивні властивості інерційних акумуляторів або вимагає застосування пристроїв, що забезпечують постійний напрямок обертання. Пристрої рекуперації, що ґрунтуються на зворотно-поступальному русі маловідомі.



a)



Б)

конструкції інерційних накопичувачів енергії

Гідравлічні дизелі із рекуперативним ефектом мають оптимальні масогабаритні характеристики; з їх допомогою найлегше досягти необхідних демпфуючих властивостей підвіски. Принцип роботи таких пристроїв в цілому аналогічний принципу роботи гідроамортизаторів, що використовуються, а саме дроселювання гідравлічної рідини через отвори клапанів. Рекуперация енергії руху рідини можлива через систему клапанів у гідроаккумуляторі. У той же час складно використати запасену енергію гідравлічної рідини. Особливо гостро це проявляється у вантажних автомобілях, тому що в їх конструкції немає споживачів цієї енергії, що постійно працюють. Тому в більшості розробок [29, 30] для зберігання енергії накопичувачі використовуються електрогенератори з приводом від гідромотора. На малюнку 1.2 показаний один із варіантів конструкції такого рекуператора.

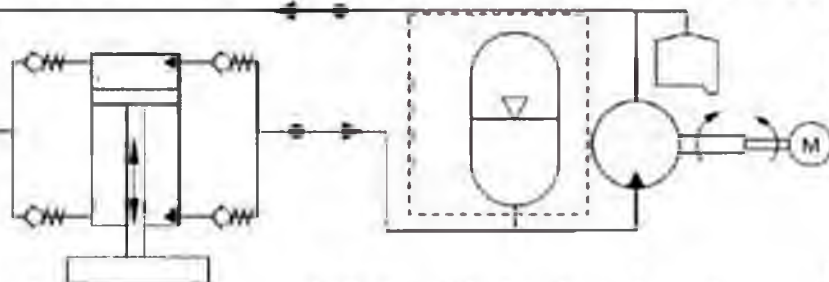


Рисунок 1.2 Варіант конструкції гідродизелю

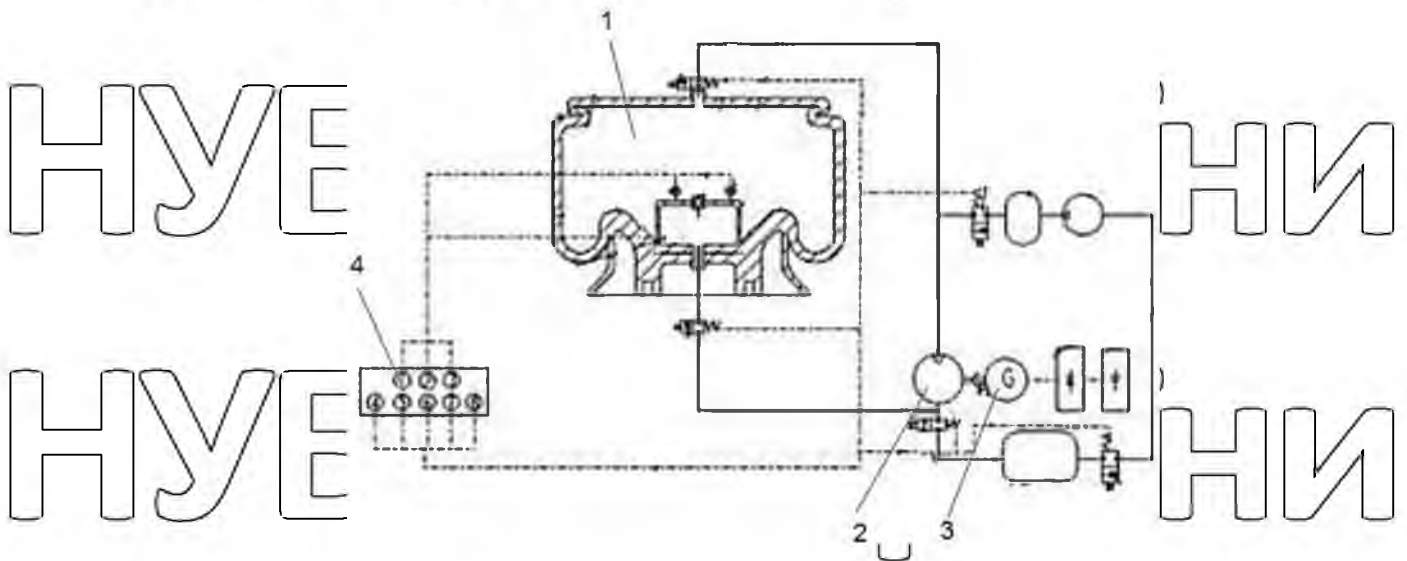
У роботах [31, 32] використаний аналогічний принцип, заснований на гідравлічній енергії потоку рідини при поворотно-поступальному русі поршня в електричну електрогенератором, встановленим на валу гідромотора (рис. 1.3).







На малюнку 1.4. Показано схему пневмопідвіски з рекуперацією енергії, що складається з пневмопружного елемента, пневмодвигуна 2, електрогенератора 3 і блоку управління 4. Принцип роботи аналогічний розглянутим вище системам, за винятком того, що в цьому випадку робочим середовищем є повітря [33].



1 – пневмопружний елемент, 2 – пневмодвигун, 3 – генератор, 4 – блок управління

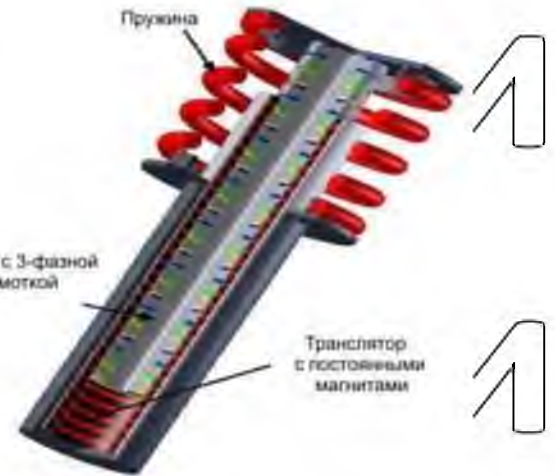
Малюнок 1.4. - Схема пневмопідвіски з рекуперацією енергії

Використання фрикційних демпфуючих елементів, принцип дії яких заснований на роботі сили тертя та дисипації теплової енергії для рекуперації енергії [34, 35], утруднено через великі габарити та масу, напр. Це у свою чергу ускладнює компоновання в автомобілі, а також пов'язане зі складністю виготовлення та підвищеним зносом фрикційних елементів.

До електромагнітних ДЕ з регенеративним ефектом відноситься розробка фірми Bose (рис. 1.5), у якій функції ДЕ та ДЕ виконують лінійні електричні машини на основі лінійного синхронного генератора з постійними магнітами, описана в [36]. У розробці [37, 38] також розглядається амортизатор з регенеративним ефектом, що є лінійним індукторним генератором. Вирішальною перевагою електромагнітної системи є короткий час реакції електричної машини на нерівності дорожнього покриття.



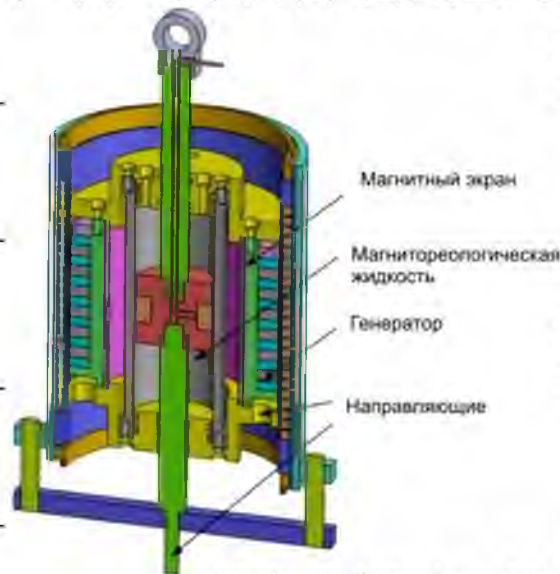
а)



б)

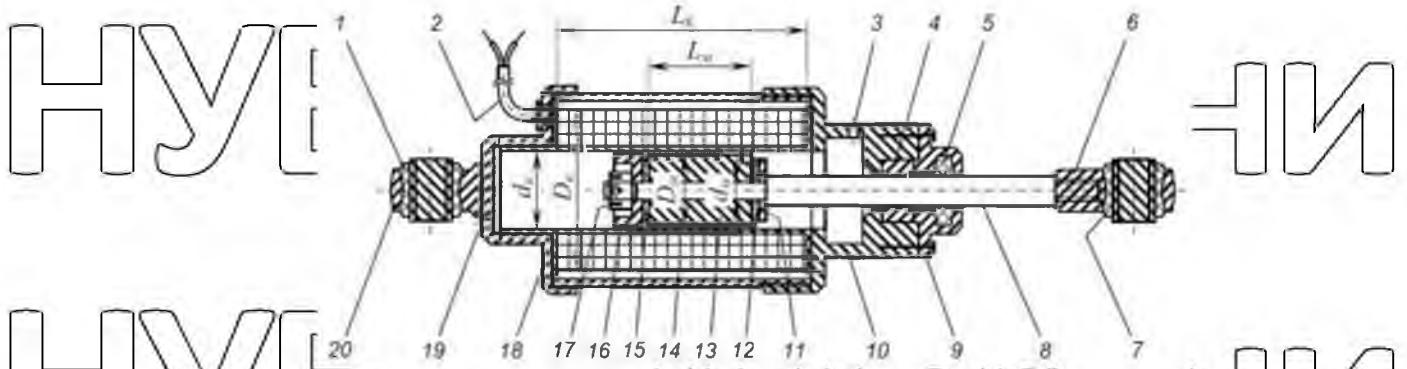
а) Схема передньої підвіски Bose; б) Амортизатор підвіски Bose Рівнуок 1.5 – Підвіска Bose з ЕД на основі лінійної електричної машини

У роботі [39] була запропонована комбінована конструкція електромагнітного амортизатора з гідравлічною демпфуючим ступенем амортизатора та генератором (рис. 1.6).



Малюнок 1.6 – Конструкція амортизатора з вбудованим генератором

У роботі [40] описаний лінійний двигун з постійними магнітами для амортизатора автомобіля УАЗ, встановлений разом із гідроамортизатором (рис. 1.7).



1 і 7 – амортизуючі втулки; 2 – виведення кабелю котушки генератора; 3 та 19 – декомпресійні отвори; 4 та 16 – втулки з ковзного матеріалу; 5 – сальник; 6 і 20 – нижнє та верхнє кільця кріплення; 8 – стрижень; 9 та 10 – кришка сальника та корпус генератора; 11 – опорний диск; 12 та 15 – Еластичні шайби; 13 – постійний магніт; 14 – котушка генератора; 17 – корончаста гайка; 18 – Корпус генератора

Рисунок 1.7 Принципова схема лінійного електромагнітного генератора

Шасі Audi eROT у своїй конструкції використовує амортизатор із електричним генератором [41]. На цьому спільному підприємстві використовується БД на основі електрогенератора, що обертається (рис. 1.8), вхідний вал якого приводиться в обертання напрямними елементами підвіски через набір шестерень.



Малюнок 1.8 – Підвіска Audi eROT

У роботі [42] стверджується, що генератори, що обертаються, мають перевагу перед лінійними генераторами по питомій вироблюваній потужності і коефіцієнту демпфування. При використанні електричних машин, що обертаються, у складі електромагнітних електродвигунів в систему входить привід, що перетворює зворотно-поступальний рух у обертальний.

У розробці [43] представлений спосіб перетворення зворотно-поступального руху колеса транспортного засобу щодо його корпусу в обертальний рух генератора, що використовує привід важеля для вироблення електроенергії для зарядки акумулятора транспортного засобу. Дана конструкція має великі габарити та високу складність конструкції, що ускладнює її розміщення у транспортних засобах. Крім того, конструкція перетворювача поступального руху спричиняє виникнення динамічних радіальних сил на роторі електричної машини.

У [44] у складі амортизатора підвіски автомобіля пропонується використовувати електричний роторний генератор, що перетворює зворотно-поступальний рух штока амортизатора в обертальний за допомогою рейкового механізму та конічної передачі. Як генератор обертання пропонується двигун із постійними магнітами (рис. 1.9).



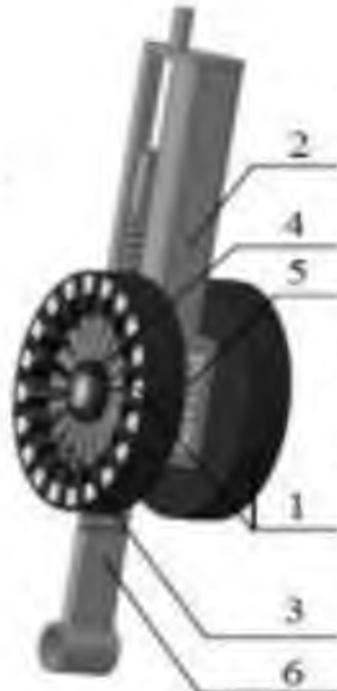
Малюнок 1.9 Конструкція регенеративного амортизатора з механізмом приводу, що складається з рейкової та конічної передачі

Поворотно-поступальний рух рухомої частини амортизатора за допомогою рейкової, шестерні та конічної передачі перетворюється на обертання генератора, що виробляє електроенергію для зарядки бортового акумулятора. У цьому пристрої відбувається подвійне перетворення енергії. Використання механічних трансмісій, які дуже незадовільно функціонують за умов високих динамічних навантажень на вузли підвіски (особливо на вантажних автомобілях), суттєво знижує надійність пристрою. При цьому збільшуються розміри амортизаторів. Схожа конструкція розроблена в Сибірському федеральному університеті, описана у [45] (рис. 1.10).

НУБІП даїни

НУБІП даїни

НУБІП раїни



1 – генератори, 2 – корпус, 3 – ротори генератора, 4 – обгінна муфта, 5 – мультиплікатор, 6 – рейка

Мацнонок 1.10 – Електромагнітний амортизатор

НУБІП українни

[46] розглянуто складніший механізм трансформації, що допускає кручення генератора в один бік (рис. 1.11). Амортизатор має рейковий механізм, що перетворює лінійний рух поршня в односпрямований обертальний рух ротора генератора.

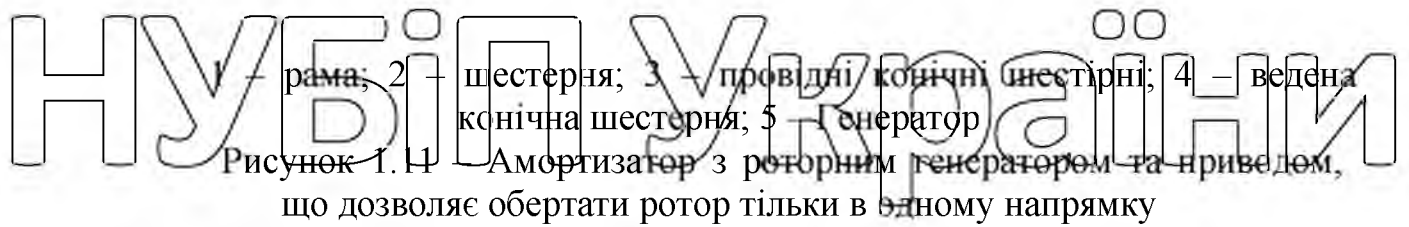
НУБІП іїни

НУБІП іїни

НУБІП іїни



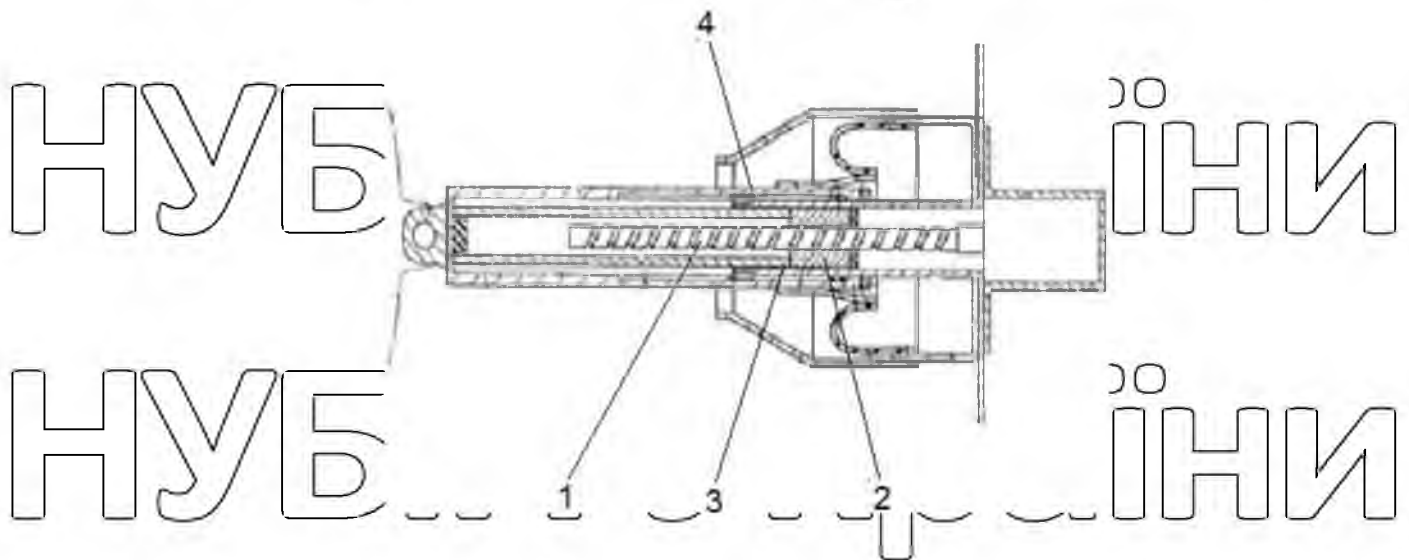
Увеличенный вид



Одностороннє обертання ротора в різні боки руху колеса забезпечують дві конічні шестірні, які через дві обгонні муфти з протилежними напрямками замикання пов'язані з шестернею, веденою з якорем генератора.

Однак така схема ускладнює конструкцію, а використання обгонних муфт при ударних навантаженнях у підвісці призводить до значного скорочення їх

терміну служби. При його розробці [47, 48] був використаний принцип перетворення поступального руху на обертальний рух електрогенератора за допомогою ШВП (рис. 1.12).



Перевага цього рішення полягає в компактності конструкції та підвищенні ефективності перетворення енергії. Однак така схема ускладнює конструкцію та призводить до використання обгонних муфт при ударних навантаженнях у підвісці, значного скорочення їх терміну служби.

У роботах [49, 50, 51, 52] розглянуто різні варіанти конструкції вузлів електричних машин з метою підвищення демпфуючого ефекту та зниження негативного впливу вихрових струмів при нормальній роботі амортизатора. При проектуванні генераторів електромагнітної енергії розробники використовують як плоскі, і циліндричні електричні машини. Недоліком звичайних плоских лінійних двигунів є те, що велика сила прикладається

перпендикулярно поверхні ротора, що рухається [53]. Вирішенням цієї проблеми є конструкція лінійного двигуна циліндричної форми, в якій через радіальну симетрію не виникає нормальної сили. У роботах [54, 55, 56, 57] циліндричні лінійні генератори представлені як ДУ. Якщо електричні параметри циліндричних і плоских електричних машин, що розглядаються, однакові, в останніх виникають великі втрати. [58, 59] для підвісок ДЕ пропонується використовувати лінійний генератор з активним статором і пасивним транслятором (ротором). ПП з ефектом відновлення енергії деформації можуть мати функції зміни властивостей. Одним із основних недоліків ПП з функцією зміни властивостей залишається високе енергоспоживання. Теоретичні дослідження та масштабні випробування показують [19], що активна підвіска споживає від 10 до 30% потужності двигуна, що пов'язано з необхідністю подачі живлення на систему керування.

### 1.3. Типи електричних машин, призначених для використання в рамках

АРЕ у конструкціях, у яких для зберігання енергії використовуються гідравлічні, інерційно-механічні та пневматичні пристрої рекуперації, застосовується електромеханічний перетворювач (електрогенератор).

Найпростіше використовувати електричну енергію в транспортних засобах та тракторах, оскільки там постійно працюють електричні пристрої. Для підвищення ефективності АРЕ має сенс безпосередньо розглядати конструкції тільки з перетворенням енергії механічних коливань на електромагнітну енергію і далі на електричну. Отже, АРЕ повинен містити вузли, які здійснюють це перетворення, а саме електромеханічний перетворювач у вигляді електричного генератора. Електричні генератори використовуються для вироблення електричної енергії. Процес перетворення енергії відбувається у електричних машинах. У електричних генераторах механічна енергія перетворюється на електричну. Принцип дії будь-якої електричної машини ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції. Електричний струм виникає в провідниках під дією електромагнітної індукції внаслідок їх взаємодії з магнітним полем, що змінюється.

В електричних машинах перетворення енергії зазвичай включає дві основні частини: рухому і нерухому, які рухаються відносно один одного. Один із них створює магнітне поле, що змінюється у просторі. В іншій, нерухомій частині, при русі рухомої частини при її взаємодії з магнітним полем, що змінюється, індукується ЕРС і створюється електричний струм.

При взаємодії цього струму з магнітним полем в обмотці створюються електромагнітні сили, спрямовані таким чином, що перешкоджають зміні магнітного поля і, отже, рухомої частини.

В даний час у техніці є велика кількість електричних машин (ЕМ). Все різноманіття електричних машин можна класифікувати за рядом критеріїв: за призначенням, за родом струму, за видом механічного руху, за потужністю, за швидкістю або швидкістю, за ступенем пиловологозахисту, за режимом роботи, функції, операційної групи, за способом установки.

Залежно від призначення електромобілі поділяються на електродвигуни та електрогенератори.

За родом струму: машини постійного та змінного струму.

За типом механічного руху розрізняють обертові (обертальні) і лінійні (поступальні) машини.

По потужності мікромашини – до 500 Вт, малої потужності – від 500 Вт до 10 кВт, середньої потужності – від 10 до 100 кВт та великої потужності – понад 100 кВт. Електричні машини з демпфуючими елементами з регенеративним ефектом відносяться до машин малої потужності.

По частоті обертання чи швидкості руху розрізняють повільні швидкості - до 300 об/хв, середні швидкості - від 300 до 1500 об/хв, високі швидкості - від 1500 до 6000 об/хв, надвисокі швидкості - понад 6000 об/хв. Електромобілі в АРЕ слід розділити на тихохідні, середньошвидкісні та високошвидкісні залежно від їхньої конструкції за умови використання передавальних механізмів та передач.

За ступенем пиловологозахисту електричні машини класифікують згідно [60] на:

- Відкрита версія (відповідає класу захисту IP00),
- Захищений (IP21, IP22),



Захист від бризок та надіння (IP23, IP24),

Водонепроникний (IP55, IP56),

Пилонепроникний (IP65, IP66),

– Закритий (IP44, IP54),

– Герметичний (IP67, IP68).

З умов експлуатації електромобілів в АРЕ, застосовується герметична конструкція машин. Тому АРЕ повинні мати щодовологозахист не нижче IP 67, так як підвісні вузли працюють в умовах підвищеного впливу пилу і вологи, аж до занурення у воду.

Оскільки електромобілі в АРЕ схильні до вібрацій і ударів, що виникають при русі по нерівних дорогах, їх відносять до експлуатаційної групи М30 [61].

За своїми експлуатаційними характеристиками електричні машини поділяються на 10 груп (С1–С10) згідно [62]. Для автомобілів з амортизаторами з регенеративним ефектом визначити режим роботи складно, оскільки умови експлуатації сильно залежать від багатьох факторів: швидкості, стану дороги, завантаження автомобіля і т.д.

Крім класифікації за родом струму, всі електричні машини класифікують ще й конструкції [63, 64, 65, 66, 67].

До групи лінійних електричних машин входять лінійно-реактивні та синхронно-лінійні машини, у тому числі із збудженням постійними магнітами.

До групи електричних машин постійного струму входять з постійними магнітами (ЧМ), з електромагнітами, з незалежним включенням обмоток (незалежне збудження), з послідовним включенням обмоток (послідовне збудження), з паралельним з'єднанням обмоток (паралельне збудження), змішаним включенням обмоток (змішане збудження).

Тип з'єднання обмоток статора істотно впливає на тягові та електричні властивості електродвигуна.

Переваги машин постійного струму:

– простота пристрою та управління;

– практично лінійні механічні та керуючі характеристики двигуна;

- легкий контроль швидкості;

- гарні пускові властивості (високий пусковий момент);

Недоліки електричних машин постійного струму:

- низькі показники питомої потужності та крутного моменту

- високі виробничі витрати;

- Для живлення електродвигуна від мережі змінного струму необхідно використовувати пристрої для випрямлення

- необхідність профілактичного обслуговування колекторно-щіткових

агрегатів;

- обмежений термін служби через знос колектора.

Через ці недоліки, основними з яких є низька питома потужність і крутний момент, а також низька надійність колекторного вузла, машини постійного струму не застосовуються в конструкції амортизаторів з регенеративним ефектом.

Машини змінного струму поділяються на асинхронні машини (АС), синхронні машини з постійними магнітами (СПМ) та реактивні машини з перемикачем (VI).

На малюнку 1.13 показані різні варіанти конструкції явних та неявних полюсів ротора, аксіально-розширених роторів (д, е), а також показані ротори з бар'єрами (в і з).

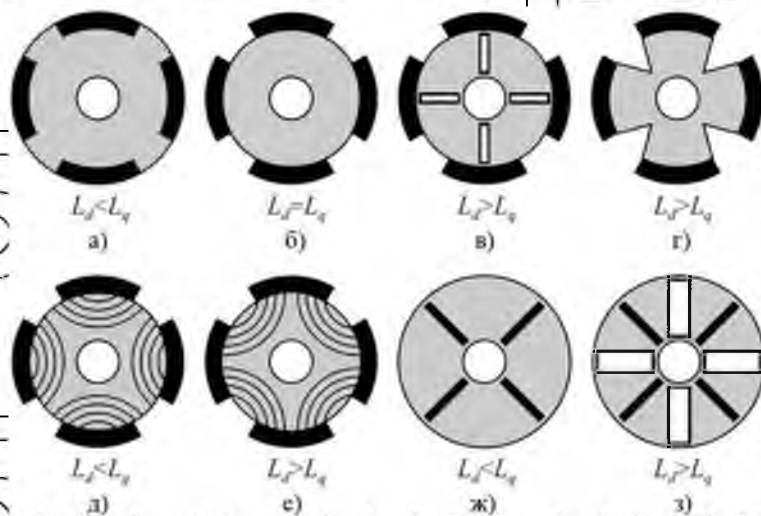


Рисунок 1.13 – Секції ротора

Залежно від конструкції ротора синхронний двигун із постійними магнітами також поділяють на:

Синхронний двигун з постійними магнітами поверхневого монтажу

— рисунок 1.14:

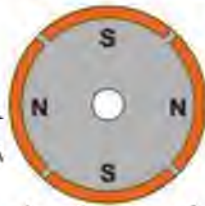


Рисунок 1.14 – Ротор синхронного двигуна з постійними магнітами поверхневого монтажу

Синхронний двигун із вбудованими магнітами — малюнок 1.15.



Рисунок 1.15 – Ротор синхронного двигуна із вбудованими магнітами

На малюнку 1.16 показані демпфуючі характеристики амортизатора,

встановленого в підвісці сільськогосподарської вантажівки, а на малюнку

1.17 показано його габаритні розміри.

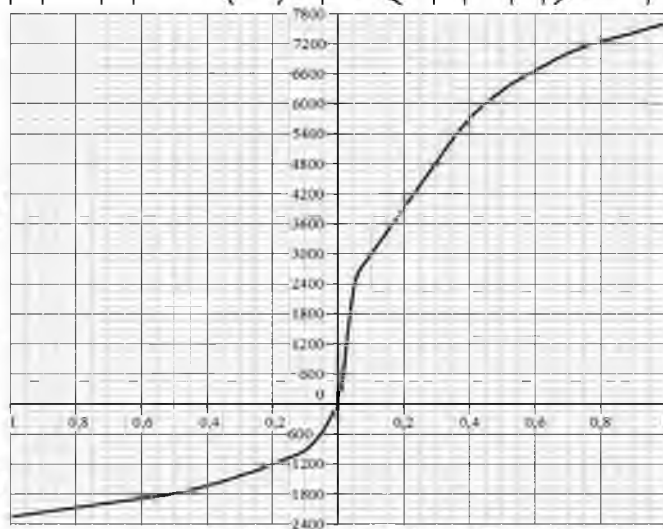
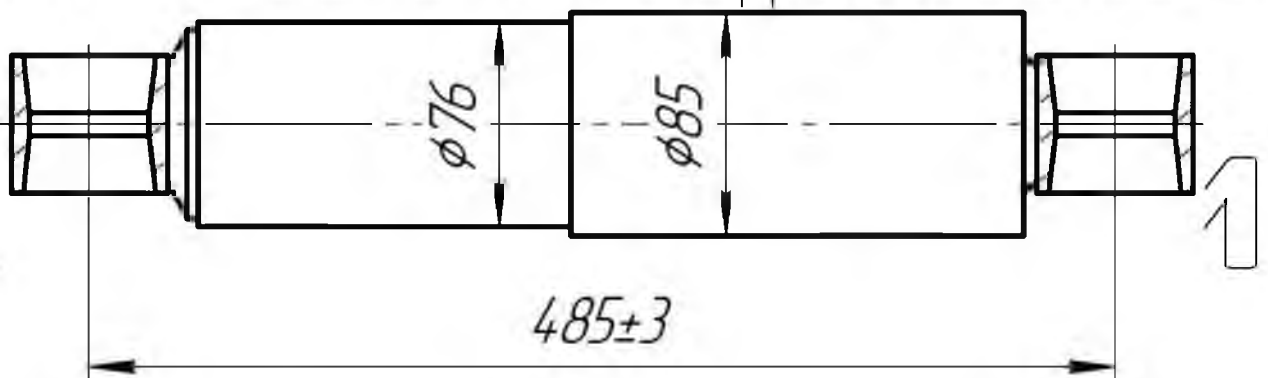


Рисунок 1.16 – Залежність сили опору



Малюнок 1.17 – Габаритні розміри амортизатора

У таблиці 1.1 наведено вимоги до конкретних технічних характеристик амортизаторів вантажних автомобілів, визначені на підставі аналізу конструкторської документації та технічних характеристик амортизаторів, що застосовуються на автомобілях КАМАЗ. Одними з найважливіших вимог до ДЕ є високі значення питомих потужностей та зусиль, а також значення щільності сили та потужності з метою забезпечення необхідного демпфування та дисипації енергії деформації.

Таблиця 1.1

Вимоги до конкретних властивостей амортизаторів

параметр	Значення
Питома потужність, кВт/кг	1,0 - 1,5
Питома густина потужності, кВт/л	2,5 - 2,7
Питома сила, Н/кг	700 - 1000
Питома густина сили, Н/л	2500 - 3000

Результати аналізу питомих показників електричних машин представлені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Результати порівняльного аналізу різних типів електричних машин у складі амортизатора з регенеративним ефектом

параметр	ДБТ	Змінний струм	ВІ	СЗМ
Питома потужність, кВт/кг	0,3 - 0,4	0,5 - 0,6	0,9 - 1,0	1,5 2 і більше
Питома густина потужності, кВт/л	0,4 - 0,5	1,8 - 2,2	2,3 - 2,5	6,8 - 7,2
Питомий момент, що крутить, Нм/кг	1,0 - 1,2	1,8 - 2,0	3,5 - 4,0	4,8 - 5,2
Питома щільність моменту, що крутить, Нм/л	4,7 - 5,0	6,4 - 6,8	7,8 - 8,2	18,2 - 22,2

Ефективність	64 – 76	80-82	85-86	92-95
--------------	---------	-------	-------	-------

з таблиці 1.1 видно, що з використання в амортизаторах з регенеративним ефектом найбільш перспективні синхронні електричні машини з збудженням постійними магнітами.

Таким чином, синхронні генератори з постійними магнітами мають такі переваги:

- високі питомі експлуатаційні та міцнісні властивості;
- висока надійність;
- простота конструкції;
- висока ефективність;
- низька інерційність при перехідних процесах;
- найкращі вагогабаритні характеристики.

До недоліків синхронних генераторів з постійними магнітами належать:

- Відсутність прямого методу регулювання напруги через складність зміни потоку збудження постійних магнітів;
- Висока вартість магнітів.

Магніти, які можуть бути використані в конструкції АРЕ для виготовлення полюсів ротора, вибираються на основі порівняння показників сучасних постійних магнітів, а саме залишкової індукції  $B_r$ , коерцитивної сили  $H_c$ , робочої температури  $T_w$  та відносної вартості. Ці дані представлені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння показників магнітотвердих матеріалів

параметр	ПМ на основі заліза, барію або стронцію (FeBa, фес)	ПМ на основі самарію та кобальту ( $Sm_2Co_{17}$ , $SmCo_5$ )	ПМ на основі неодиму, заліза та бору (NdFeB)
Залишкова індукція $B_r$ , Тл	0,2÷0,4	0,9÷1,1	1,1 ÷ 1,3
Коерцитивна сила $H_c$ , кА/м	400÷500	900 ÷ 1000	1200÷1300
Робоча температура $T_w$ , °С	600	250÷350	80÷210
Вартість, дол.	0,05÷0,1	1,2÷1,4	1

Рекомендується вибирати ПМ на основі інтерметалевого з'єднання рідкісноземельних матеріалів неодиму, заліза та бору (NdFeB). Варто зазначити, що генератори СЗМ не вимагають обслуговування, що є важливим при сільськогосподарських роботах.

У складі АРЕ у вигляді електромеханічного перетворювача найкраще підійде електросинхронна машина з постійними магнітами:

- лінійний синхронний генератор;
- синхронний генератор, що обертається.

### Висновки за розділом 1

На основі аналізу розробок та досліджень щодо створення спільних підприємств з рекуперацією енергії з'ясовується, що у переважній більшості споруд запас енергії здійснюється безпосередньо за допомогою електричного генератора. Для досягнення максимальної ефективності необхідно мінімізувати кількість перетворень енергії у процесі її накопичення. Це досягається за рахунок використання електромагнітного АРЕ, що виключає гідравлічні проміжні шаблі, інерційні шаблі та інші шаблі, при цьому механічна енергія перетворюється на електричну з високим ККД, а потім в енергію зберігання або використовується споживачами. Накопичувачем енергії може бути батарея високої або низької напруги (AB) або батарея суперконденсатора (SC). Використання АРЕ також дозволяє керувати характеристиками, що демпфують, залежно від умов руху машини за допомогою електронних пристроїв системи управління і змінювати струм навантаження. Сільськогосподарські машини та трактори мають постійно працюючі споживачі електроенергії. На підставі аналізу вимог ДЕ, синхронні генератори на постійних магнітах найбільш придатні для використання в конструкції АРЕ завдяки високим питомої потужності, що генерується, і зусиллю (крутному моменту), що розвивається, а також щільності потужності і зусилля. Ці генератори компактні, надійні та прості у використанні.

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В АМОРТИЗАТОРАХ З РЕГЕНЕРАТИВНИМ ЕФЕКТОМ

### 2.1 Математичний опис процесів у системі підвіски під час руху.

Під час руху дорогою автомобіль сприймає кінематичні обурення, викликані нерівностями дороги. Ці обурення викликають складні коливання підресореної та безпружинної мас автомобіля. У загальному випадку транспортний засіб та його окремі маси можуть здійснювати всі види коливань вздовж та навколо осей координат. Доцільно враховувати основні вібраційні процеси: вертикальні, поздовжні та поперечні кутові коливання, які роблять основний внесок у обурення.

Рівняння руху динамічної системи (14), тобто. транспортного засобу, мають вигляд [21].

$$m_{\text{ВЕЧІРА}} z_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{\text{Пij}} h_{z\text{Пij}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{\text{Пij}} h_{z\text{Пij}} = 0, \quad (2)$$

$$J_y \ddot{\phi}_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^m k_{\text{Пiy}} h_{\text{Пiy}} l_{iy} + \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^m c_{\text{Пiy}} h_{\text{Пiy}} l_{iy} = 0, \quad (3)$$

$$J_x \ddot{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^m k_{\text{Пiy}} h_{\text{Пiy}} y_{iy} + \sum_{i=1}^n \sum_{y=1}^m c_{\text{Пiy}} h_{\text{Пiy}} y_{iy} = 0, \quad (4)$$

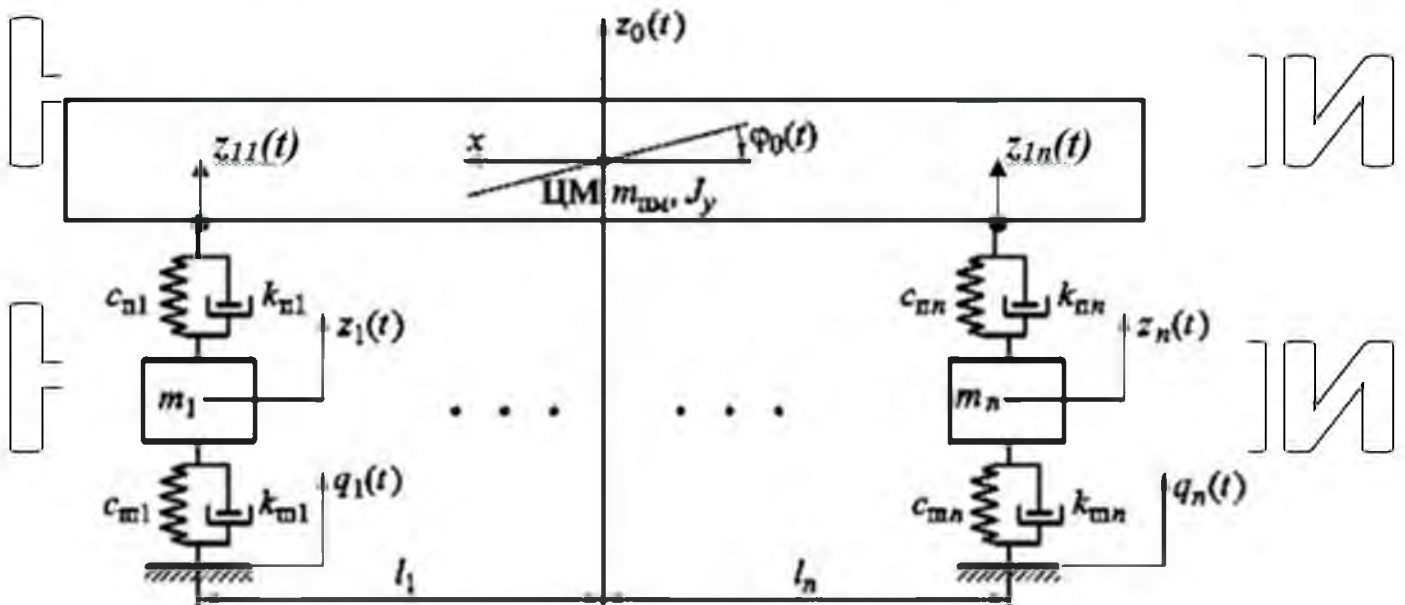
$$m_{ij} \ddot{z}_{iy} - k_{\text{Пij}} h_{z\text{Пij}} + k_{\text{Шij}} (z_{ij} - q_{ij}) - c_{\text{Пij}} h_{z\text{Пij}} + c_{\text{Шij}} (z_{ij} - q_{ij}) = 0, \quad (5)$$

де  $m_{пм}$  - маса підресореної частини автомобіля;  $m_{ij}$  - маса колеса;  $z_0$  - узагальнена координата вертикального переміщення центру ваги автомобіля;  $\varphi_0$  - узагальнена координата точки транспортного засобу з позовжньо-кутовим усуненням;  $\beta_0$  - узагальнена координата точки транспортного засобу при поперечному кутовому зміщенні;  $z_{ij}$  - узагальнена координата вертикального переміщення точки транспортного засобу,  $k_{пij}$ ,  $c_{пij}$  - коефіцієнти демпфування та жорсткості підвіски колеса, наведені до центру плями контакту шини з дорогою;  $J_y$ ,  $J_x$  - моменти інерції підресореної частини автомобіля щодо поперечної та позовжньої осей, що проходять через центр тяжіння;  $h_{пij}$ ,  $h_{пij}$  - деформація та швидкість деформації підвіски колеса, що визначаються за рівняннями (6, 7):  $B_{ij}$  - відстань від центру мас підресореної частини автомобіля до колеса в позовжній та поперечній площинах, що проходять через центр мас;  $k_{shij}$ ,  $c_{shij}$  - коефіцієнти демпфування та жорсткості коліс;  $q_{ij}$  - кінематичне збурення, висота нерівності дороги;  $i, j$  - номер осі та колеса цієї осі;  $n, m$  - кількість осей транспортного засобу та осьових коліс

$$h_{zпij} = z_0 + l_{ij}\varphi_0 + B_{ij}\beta_0 - z_{ij}h_{zпiy}, \tag{6}$$

$$h_{zпiy} = z_0 + l_{ij}\varphi_0 + B_{ij}\beta_0 - z_{ij}. \tag{7}$$

Для вирішення задані аналізу енергетичних характеристик системи підвіски з високим ступенем надійності можна використовувати плоску розрахункову схему руху автомобіля, що представлена на малюнку 2.1.





Малюнок 2.1 – Розрахункова схема руху транспортного засобу

Для спрощення побудови динамічної системи було прийнято такі

припущення:

- моделюється лінійний рух;

- використовуються лінійні властивості пружного елемента (E) та демпфуючого елемента (DE);

- Сили тертя у напрямному пристрої підвіски не враховуються;

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

- Вібрації, спричинені зміною швидкості автомобіля, не враховуються.  
 - Кутові коливання підресорної частини низькі;  
 - враховується рух дорогами з низькою деформацією;

- Колеса не відриваються від дороги, підвіска не ламається.

З урахуванням припущень рух автомобіля за нерівностями описується диференціалом

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

речові рівняння (8, 9, 10) [21]:

$$\square \text{спі}(z_0 + li\varphi_0) = k_{\text{ш}}i\dot{q}_i + c_{\text{ш}}i\dot{q}_i, \quad (8-\text{е місце})$$

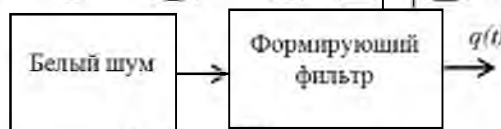
$$= \sum_{i=1}^n (k_{\text{ш}}i\dot{z}_i + c_{\text{ш}}i\dot{z}_i), \quad (9)$$

$$J_y\ddot{\varphi}_0 + \varphi_0 \sum_{i=1}^n k_{\text{ш}}i\dot{z}_i^2 + \varphi_0 \sum_{i=1}^n c_{\text{ш}}i\dot{z}_i^2 + z_0 \sum_{i=1}^n k_{\text{ш}}i\dot{z}_i + z_0 \sum_{i=1}^n c_{\text{ш}}i\dot{z}_i = \Sigma(k_{\text{ш}}i\dot{z}_i + c_{\text{ш}}i\dot{z}_i). \quad (10)$$

Перше рівняння визначає коливання безпружинних мас; друге рівняння - коливання центру мас автомобіля. Третє рівняння - поздовжні кутові коливання підресорної маси.

Кінематичне обурення від нерівностей визначається як безперервна нестационарна випадкова функція залежності висоти нерівності дороги від часу. Розглянута ділянка дороги вважається однорідною за типом покриття та ступенем його зносу.

Спектральну щільність висот нерівностей можна використовувати для оцінки кінематичного впливу перешкод транспортний засіб. Кінематичні обурення зазвичай моделюються шляхом формування випадкового процесу  $\dot{q}(t)$  із заданою спектральною щільністю  $S(\omega)$  у вигляді фільтра форми (рис. 2.2).



Малюнок 2.2 – Фільтр форми

Для формування випадкового процесу використовується фільтр форми, що відповідає спектральній щільності, що характеризує той чи інший тип дороги (табл. 2.1) [21].

Таблиця 2.1 – Відповідна кореляційна функція, спектральна щільність та формуючий фільтр

Кореляційна функція	Спектральна щільність	Фільтр форми

$$p(t) = D e^{-\alpha t} \cos \beta t$$

$$z_{\text{вк}}(\omega) = \frac{2\alpha(\alpha^2 + \beta^2 + \omega^2)}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}$$

$$B_{\text{тв}}(\sigma) = \frac{2\alpha D}{3^2 + 2\alpha^3 - \alpha^2 + \beta^2}$$

У таблиці:  $\square$  - розкид;  $\alpha$  - коефіцієнт, що характеризує ступінь нерівномірності мікропрофілю;  $\beta$  - коефіцієнт, що характеризує вузьку смугу випадкової функції мікропрофілю дороги,  $\omega$  - спектральна частотальна складова мікропрофілю дороги  $\omega = 2\pi / \lambda$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі нерівностей мікропрофілю.

Для автомобільної дороги високої якості [21]:  $D = 0,79 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $\alpha = 0,08$ ;

$$\beta = 0,143$$

Для асфальтобетонного покриття:  $D = 5,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $\alpha = 0,15$ ;  $\beta = 0$ .

Для ґрунтової дороги:  $D = 47,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $\alpha = 0,38$ ;  $\beta = 0,47$ .

Для ґрунтової дороги в поганому стані:  $D = 102,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $\alpha = 0,45$ ;

$$\beta = 0,414$$

Для обліку швидкості автомобіля замість  $\alpha$  та  $\beta$  використовуються коефіцієнти  $\alpha v$  та  $\beta v$ , що визначаються за формулами (11, 12):

$$\alpha v = \alpha \cdot v,$$

(одинадцять)

$$\beta v = \beta \cdot v.$$

(12)

Диференціальне рівняння фільтра, що моделює здатність згладжування шини, визначається за рівняннями (13, 14):

$$q_1 + \lambda B \cdot q_1 = \lambda B \cdot q_{\text{in}},$$

(13)

Для коліс і-ї осі обурення  $q_i(t)$  можна подати у вигляді рівняння

(15):

$$q_i(t) \equiv q_1(t - r_i), \quad (15)$$

де  $r_i$  - час затримки проходження обурення під і-ю віссю щодо першої осі,

що визначається за формулою (16):

$$r_i = \frac{(v_1 - l_i)}{v}. \quad (16)$$

Потужність  $N(t)$ , що перетворюється амортизаторами в тепло, розраховується із середнього значення коефіцієнта опору  $k_{\pi}$  і відносної швидкості  $v_{shi}$  стрижня [22], що визначається за рівнянням (17):

$$N(t) = \sum_{\pi=1}^n k_{\pi} \cdot v_{shi}^2. \quad (17)$$

Розсіявана енергія визначається як інтеграл потужності за часом.

(18):

$$E(t) = \int_0^t N(t) dt. \quad (18)$$

(19): Визначається абсолютна швидкість руху підресореної маси.

$$\dot{z}_{1i} = \varphi \cdot 0l_i + \dot{z}_0. \quad (19)$$

Відносна швидкість руху штока визначається як різниця між швидкістю руху безпружинної маси  $\dot{z}_i$  та швидкістю руху підресореної маси до передній та задній осі  $\dot{z}_i$ , визначаємо  $v_{shi} = \dot{z}_i - \dot{z}_{1i}$ .

## 2.2 Математичний опис процесів, що відбуваються в електроамортизуючій машині.

Як говорилося в главі 1, АРЕ може бути сконструйований з використанням електромеханічного перетворювача енергії (генератора), що працює на основі явища електромагнітної індукції, виникнення електрорушійної сили (ЕРС) та електричного струму у провіднику при взаємодії з магнітним полем, яке змінюється в часі та просторі. Зміна магнітного поля відбувається за рахунок руху (лінійного чи обертального) рухомої частини ЕМ. Генерований струм та ЕРС у провіднику направляються таким чином, щоб запобігти зміні магнітного поля, тобто створюється протидіюча руху сила, що створює демпфуючу силу.

Для будь-якого ланцюга, що містить джерело енергії та котушку індуктивності, яка також може бути фазовою обмоткою генератора, застосовується таке в рівняння  $u = Ri + \frac{d\Phi}{dt}$ , де  $u$  - напруга в ланцюзі,  $i$  - струм,  $R$  - активний опір ланцюга,  $\Phi$  - магнітний потік, пов'язаний з усіма витками котушки (потік зв'язок). Загалом до ЕМ можна віднести з'єднання з такими ланцюжками, і до них застосовується цей вираз:

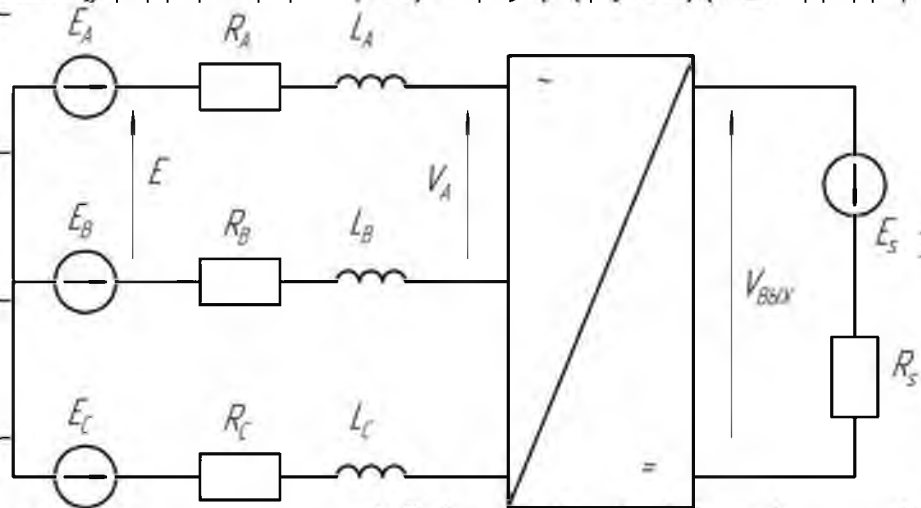
$$E = Ri + \frac{d\Phi}{dt}$$

Виникнення ЕРС супроводжується створенням електричного струму в індукторі, що дозволяє зберігати електричну енергію за наявності накопичувача енергії. Для невеликого інтервалу часу  $dt$ , помножуючи на  $idt$ , отримуємо  $dW_e = Ri^2 dt + i d\Phi$ . Ліва частина виразу являє собою кількість елементарної енергії, що повідомляється або передана джерелу енергії  $dW_{ист}$ , а права частина являє собою суму елементарних втрат  $dW_{втрати}$  в ланцюзі та зміна електромагнітної енергії  $dW_{EM}$ .

$$dW_e = dW_{втрати} + dW_{EM}$$

Ротор (ЗМ) є постійним магнітом. При русі ротора (лінійному або обертовому) витки обмоток статора перетинають магнітне поле, що змінюється, викликаючи в обмотках ЕРС. Лінійну електричну машину можна представити як окремий випадок електричної машини, що обертається, що працює на площині. При роботі генератора або двигуна створюється магнітне поле, що змінюється, а значить, існує змінний магнітний потік.

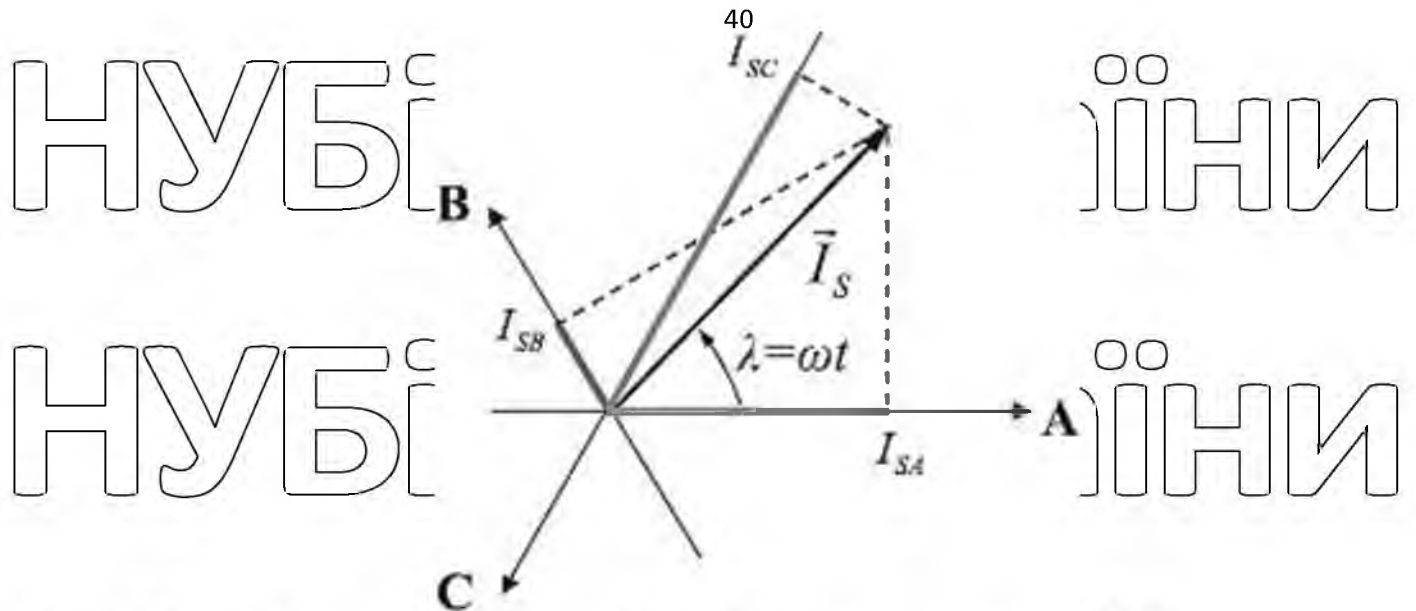
На малюнку 2.3 показано еквівалентну схему АРЕ.



$R_A, R_B, R_C$  – активний опір фазних обмоток,  $L_A, L_B, L_C$  індуктивність фазних обмоток,  $E_A, E_B, E_C$  – фазна ЕРС,  $R_S$  внутрішній опір накопичувача,  $E_S$  – накопичувальна ЕРС

Малюнок 2.3 – Еквівалентна схема

Математичний опис процесів, що відбуваються в електричній машині як електромеханічному перетворювачі, проводиться на основі теорії електричних машин і подвійного перетворення координат з використанням трьох-або багатозазної електричної машини у вигляді двополусної схеми. Двофазна узагальнена електрична машина. В даний час трифазні машини широко використовуються у промисловості. Вони мають трифазні обмотки статора, осі яких зміщені один від одного на кут  $120^\circ$ , як показано на малюнку 2.4. Осі обмоток відповідають осям координат системи та перетинаються на початку координат - центрі електричної машини (вісь ротора або транслятора), її осі. А, В, С – осі фазних обмоток статора.



Малюнок 2.4 Трифазна система координат, що обертається

Струм в обмотках статора можна подати у вигляді узагальненого вектора  $I_s$ , який являє собою векторну суму векторів струмів обмоток.

При роботі електродвигуна за рахунок руху ротора вектор струму статора обертається з частотою  $\omega$  і його проєкції на відповідні осі змінюються за синусоїдальним законом. За цим же законом змінюються і струми у фазних обмотках (20, 21, 22), зберігаючи зсув на  $120^\circ$  [68, 69, 70, 71, 72, 73]:

$$I_{SA} = I_s \cos(\lambda) = I_s \cos(\omega t) \quad (20)$$

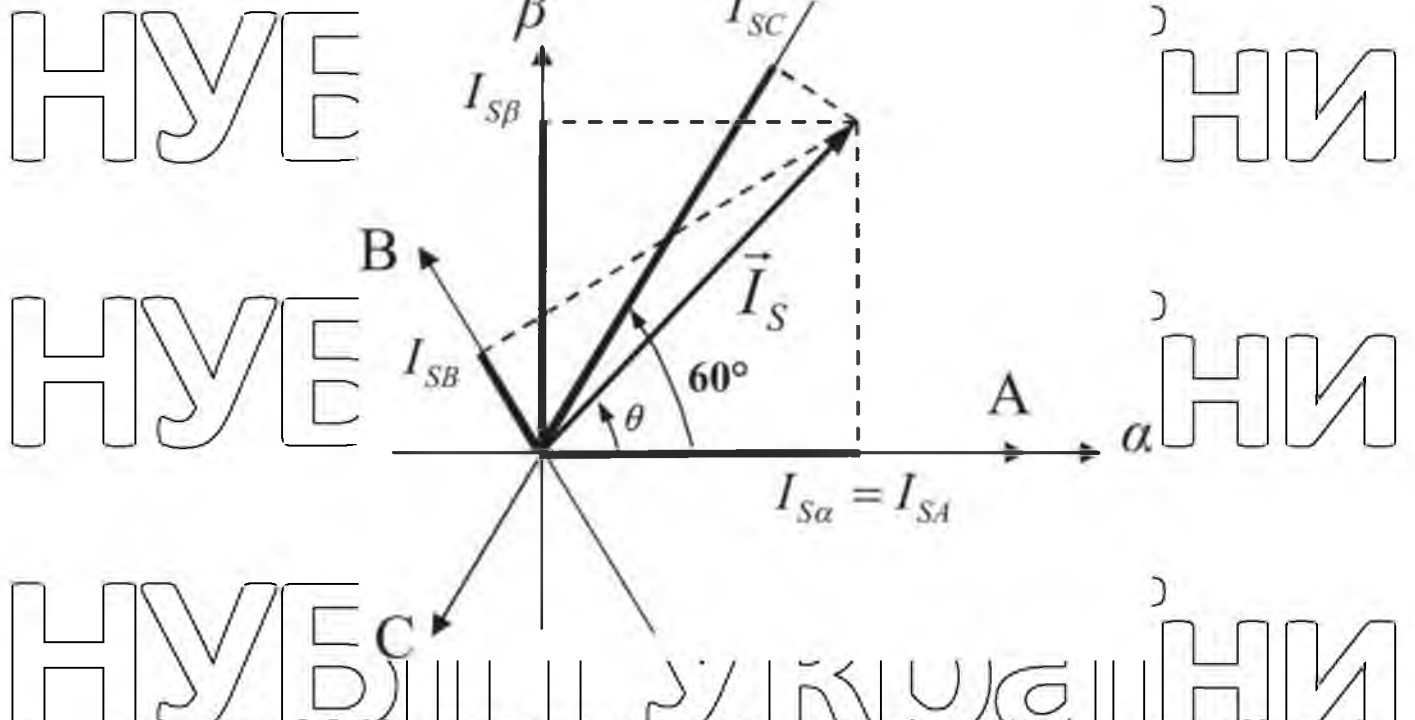
$$I_{SB} = I_s \cos(\lambda - 120^\circ) = I_s \cos(\omega t - 120^\circ); \quad (21)$$

$$I_{SC} = I_s \cos(\lambda - 240^\circ) = I_s \cos(\omega t - 240^\circ). \quad (22)$$

Також справедливе рівняння, що описує симетрію електричної машини: ?? фіксованою трифазною системою координат, називається

перетворенням Кларка (рис. 2.5). Ці перетворення можна описати переходом від реальної трифазної електричної машини до абстрактної двофазної машини (23, 24)





Малюнок 2.5 Фіксована декартова система координат (перетворення Кларка)

$$I_{S\alpha} = I_{SA}; \tag{23}$$

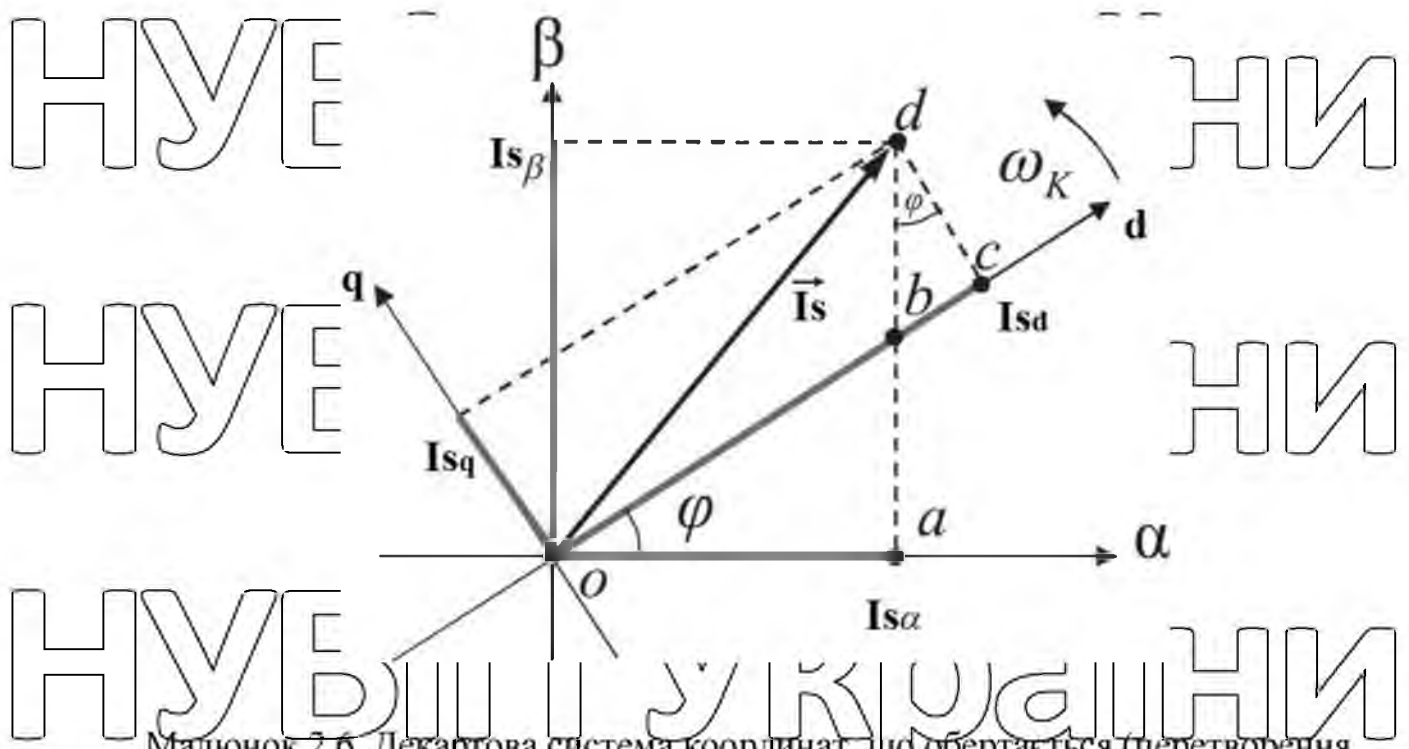
$$I_{S\beta} = \frac{I_{SB} - I_{SC}}{\sqrt{3}} = \frac{I_{SA}}{\sqrt{3}} + \frac{2I_{SB}}{\sqrt{3}} \tag{24}$$

Перетворення, що здійснюють перехід від нерухомої системи координат

$\alpha\beta$  до декартової системи координат  $dq$ , що обертається, має дві перпендикулярні осі  $d$  і  $q$ , де початок координат збігається з початком координат нерухомої трифазної і двофазної систем координат, називаються звани паркувальними перетвореннями (рис. 2.6). Координатні осі обертаються зі швидкістю  $\omega$ , що відповідає швидкості обертання ротора навколо початку осі ротора (25, 26)

НУБІП УкРАЇНИ

НУБІП УкРАЇНИ

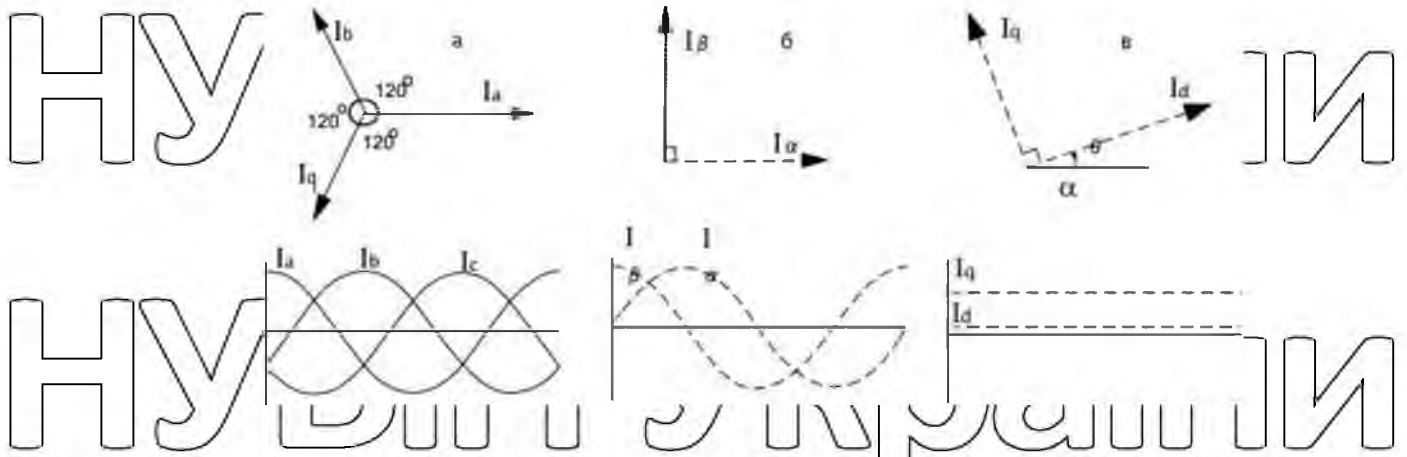


Малюнок 2.6. Декартова система координат, що обертається (перетворення паркування)

$$I_{sd} = I_{s\beta} \sin \varphi + I_{s\alpha} \cos \varphi \quad (25)$$

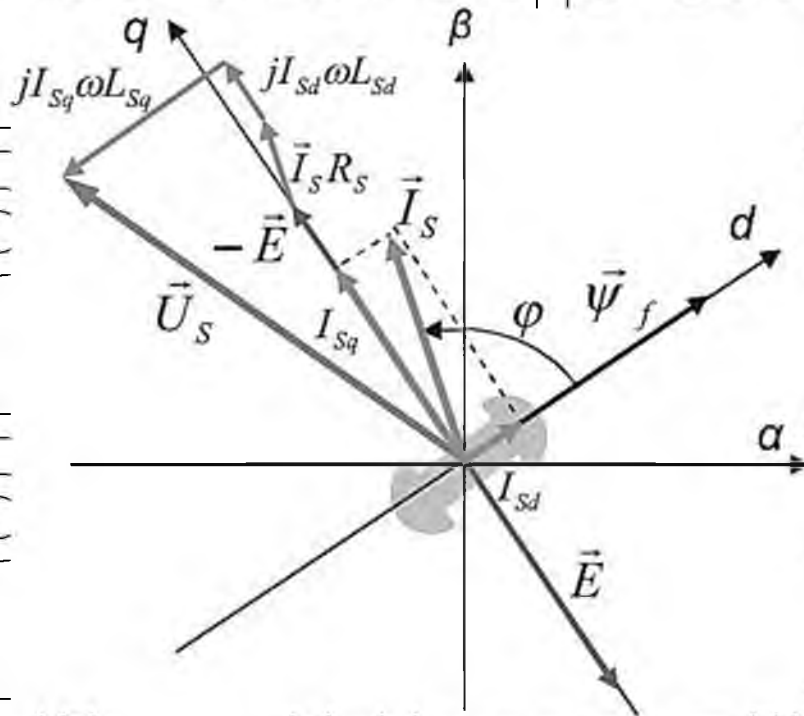
$$I_{sq} = I_{s\beta} \cos \varphi - I_{s\alpha} \sin \varphi \quad (26)$$

Узагальнений вектор струму обертається разом із системою координат і характеризується значеннями проєкцій на осі координат  $d$  і  $q$ . Описати перетворення використовують при побудові сучасних систем управління електричними машинами. На практиці обертання системи координат  $dq$  враховується шляхом вимірювання відповідними датчиками або шляхом розрахунку кута повороту ротора щодо фіксованої системи координат за заданими виразами. Управління полягає у контролі величин та знаків проєкцій векторів на осі координат  $d$  та  $q$  (рисунки 2.7). За рахунок формування певних значень проєкцій струму досягаються необхідні значення моменту або сили, що крутить, а також мінімізуються втрати енергії в електромобілі.



Малюнок 2.7 – Перетворення координат

Процеси, що відбуваються в синхронній електричній машині з постійними магнітами, пояснюються векторною діаграмою, яка представлена на малюнку 2.8. Вісь d орієнтована вздовж осі ротора



Малюнок 2.8 Схема, що пояснює процеси в електричній синхронній машині з магнітами.

Постійні магніти ротора генерують магнітне поле з потоком зчеплення  $\psi_f$ . Вектор магнітного зв'язку відстає від вектора струму на кут. Магнітне поле, що обертається, створює вектор ЕРС в обмотках статора.

Амплітуда вектора ЕРС визначається виразом (27):

$$E = \psi f \omega, \quad (27)$$

де  $\omega$  – електрична швидкість, яка визначається за формулою

$$\omega = Z p \omega R, \quad (28)$$

де  $\omega R$  - кутова швидкість ротора,

Наприклад Кількість пар полюсів.

У фіксованій системі координат рівняння рівноваги статора мають вигляд (31, 32):

$$U_{S\alpha} = \frac{d\psi_{S\alpha}}{dt} + I_{S\alpha} R_S, \quad (31)$$

$$U_{S\beta} = \frac{d\psi_{S\beta}}{dt} + I_{S\beta} R_S, \quad (32)$$

У системі координат dq рівняння рівноваги, що обертається, мають вигляд (33 – 36):

$$U_{Sd} = \frac{d\psi_{Sd}}{dt} + I_{Sd} R_S - \omega \psi_{Sq}, \quad (33)$$

$$U_{Sq} = \frac{d\psi_{Sq}}{dt} + I_{Sq} R_S + \omega \psi_{Sd}, \quad (34)$$

$$U_{Sd} = \frac{d\psi_{Sd}}{dt} + I_{Sd} R_S - \omega L_{Sq} I_{Sq}, \quad (35)$$

$$U_{Sq} = \frac{d\psi_{Sq}}{dt} + I_{Sq} R_S + \omega L_{Sd} I_{Sd} + \omega \psi_f, \quad (36)$$

Електромагнітний крутний момент в електричній машині, що обертається (REM) або сила в лінійній машині (LEM) виникає в результаті взаємодії струму і потокозчеплення статора (37, 38).

## Розділ 2. Висновки

У цьому розділі описується процес вібрації, що виникає під час руху транспортного засобу дорогою і збуджуваній кінематичними обуреннями через

нерівності дороги. Інтенсивність вібрацій залежить від інтенсивності збурень, а саме висоти та довжини нерівностей, а також від характеристик автомобіля та швидкісного режиму. Кінематичне обурення представляється як безперервна нестационарна функція залежності висот шорсткостей іноді з відповідним значенням спектральної щільності висот шорсткостей.

Демпфуюча сила в електромагнітному АРЕ виникає, коли в провіднику при взаємодії з магнітним полем, що змінюється, виникає ЕРС, що індукуює тим самим електричний струм у провіднику. Величина демпфуючої сили і потужність, що генерується, пропорційні швидкості зміни магнітного поля і, отже, величині швидкості руху або швидкості обертання.

У розділі викладено теоретичні основи процесу рекуперації енергії за рахунок виникнення електричного струму в провідниках при їх взаємодії з магнітним полем, що змінюється в АРЕ, при деформації підвіски автомобіля при русі по нерівностях дорожнього покриття при використанні АРЕ, заснований на синхронних генераторах, що обертаються.

# МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ АМОРТИЗАТОРА З РЕГЕНЕРАТИВНИМ ЕФЕКТОМ

## 3.1. Методика проведення дослідних випробувань умов експлуатації амортизаторів

### 3.1.1 Цілі та завдання дослідження

Для раціонального вибору конструкції АРЕ для сільськогосподарських машин необхідно проаналізувати та врахувати особливості умов роботи амортизатора у різних дорожніх умовах при виконанні технологічних операцій, у тому числі у рослинництві та тваринництві, землеробство. Це можна зробити шляхом аналізу експериментальних даних про пробіг експериментального автомобіля за різними дорожніми покриттями з різною швидкістю.

Основними завданнями експериментальних досліджень умов роботи елементів демпфуючих у складі колісного транспортного засобу є [5, 6, 7, 8]:

- Визначення середніх значень переміщення та швидкості штока амортизатора при русі з різною швидкістю за різними дорожніми покриттями;

покриттями;

- Визначення максимальних значень переміщення та швидкості штока амортизатора при русі з різною швидкістю за різними дорожніми покриттями;

- Визначення тимчасового розподілу величин руху та швидкості переміщення штока амортизатора під час руху сільськогосподарської машини у різних дорожніх умовах.

Основними завданнями дослідження є:

- Підготувати вимірювальні прилади, оснастивши передні та задні амортизатори автомобіля датчиками швидкості та переміщення;

- Беріть участь у гонках на заданих швидкостях та різними дорогами;

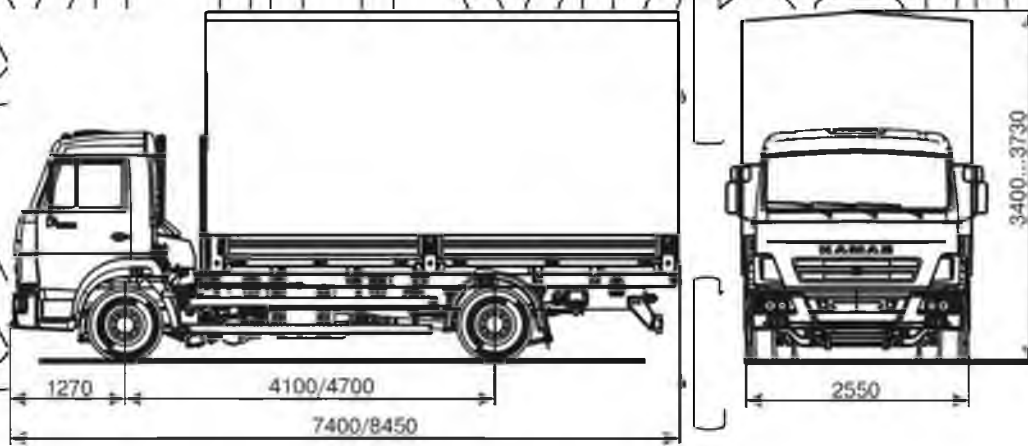
- Отримайте ряд записаних даних про швидкість та переміщення штока амортизатора в різних умовах керування.

- Виконайте статистичну обробку масиву даних.

### 3.1.2 Предмет дослідження

Об'єктами дослідження в ході експерименту були передній та задній ліві амортизатори, встановлені у підвісці автомобіля. Науково-дослідні випробування проводились на автомобілі КАМАЗ, зовнішній вигляд та габаритні розміри якого показані на малюнку 3.1, що має задній привід. Основні технічні характеристики наведено у таблиці 3.1

Предметом дослідження є значення швидкості та переміщення штока амортизатора, встановленого на автомобілі, під час руху в різних умовах руху, а також розподіл цих величин за часом руху.



Малюнок 3.1 Зовнішній вигляд та габаритні розміри автомобіля КАМАЗ повною масою 11 990 кг

Таблиця 3.1. Технічні характеристики вантажівки КАМАЗ

параметр	Одиниця зміни ваги	Значення
колійна формула		4x2
Споряджена маса	кг	6260
Повна маса	кг	11990
Вантажопідйомність	кг	5730
Вага на передній осі	кг	4360
Вага задньої осі	кг	8000
Максимальна потужність двигуна	кВт	178
Максимальний крутний момент двигуна	Нм	937
Передавальні числа шестерень трансмісії		1-6,75 2-3,60 3- 2,13 4- 1,39 5 -1,00 6- 0,78 3X - 6.06

Передавальна кількість осей	4,22
Шини	245/70 R19,5
Тип передньої підвіски	Залежить від металевих пружин.
Тип задньої підвіски	Залежить від металевих пружин.

Автомобіль має підвіску на основі напівеліптичних металевих ресор. Кожне колесо має гідравлічний телескопічний амортизатор подвійної дії.

Автомобіль має залежну підвіску всіх коліс із металевими пружними елементами у вигляді напівеліптичних ресор. Принципова схема передньої підвіски представлена малюнку 3.2, задньої підвіски — 3.3. [81, 82].

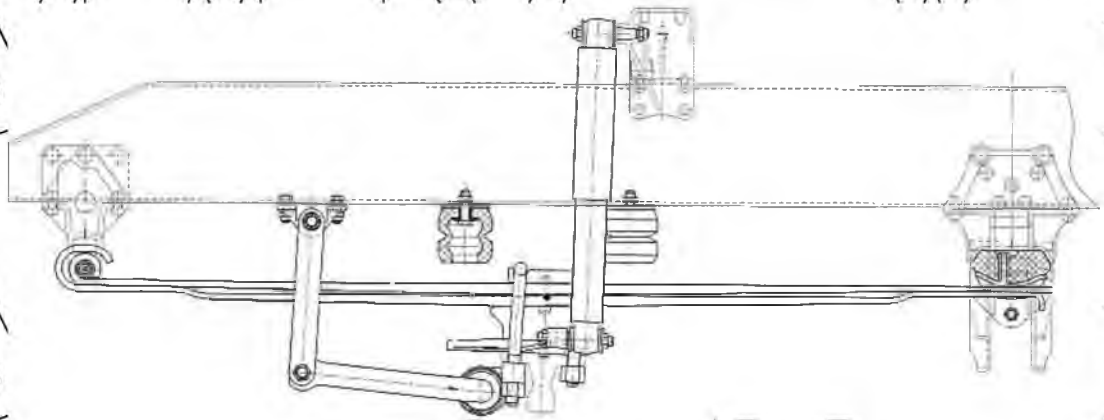
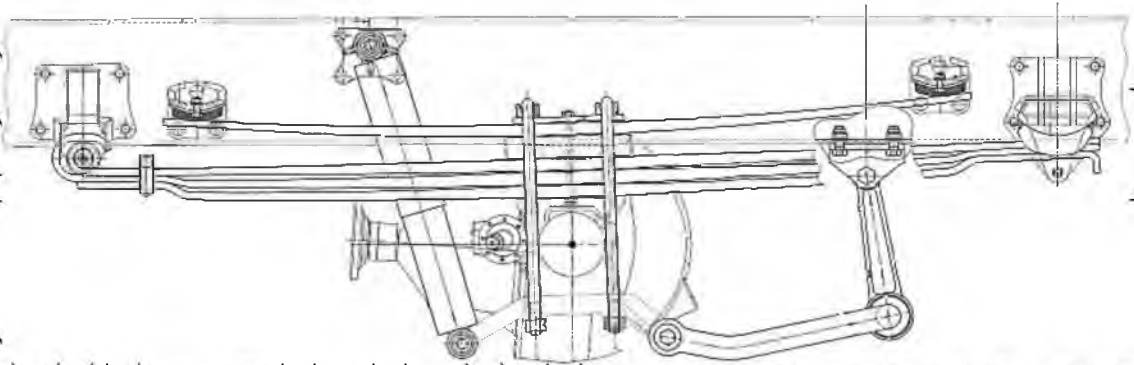


Рисунок 3.2 – Конструкція передньої підвіски випробуваного автомобіля



Малюнок 3.3 Конструкція задньої підвіски випробуваного автомобіля

Підвіски всіх коліс досліджуваного автомобіля оснащені двотрубними гідравлічними телескопічними амортизаторами ЗАТ «ПААЗ». На рис. 3.4 схематично показано будову амортизаторів випробуваного автомобіля [83, 84].



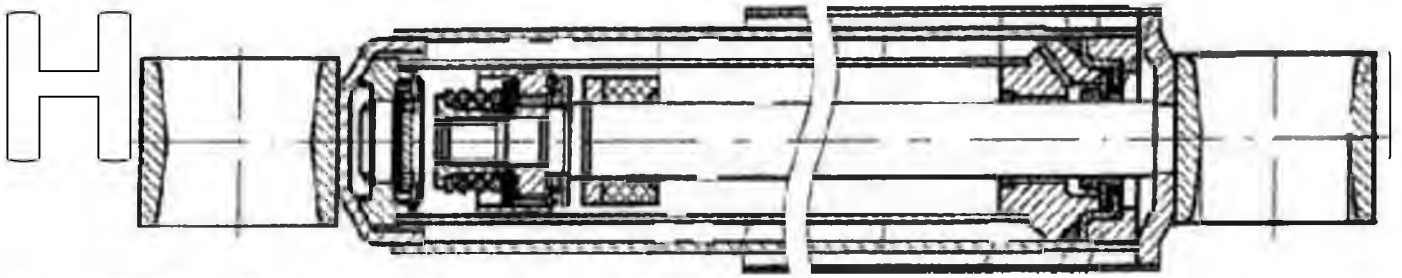


Рисунок 3.4 Принципова схема амортизатора

### 3.1.3. Процедури та методи випробувань

У рамках дослідження було зібрано такі дані:

- Переміщення штока лівого переднього та заднього амортизатора,
- Швидкість переміщення штока лівого переднього та заднього амортизаторів.

Відповідно до [85, 86] всі сільськогосподарські дороги діляться на 5 категорій залежно від їх призначення та середньодобової інтенсивності руху.

Дороги різних категорій висувають різні вимоги до макро- та мікропрофілів. Роботу/комплекту АРЕ під час руху у складі транспортного засобу дорогами 1, 2 категорії (дороги, що з'єднують адміністративний центр сільського

поселення з дорогами загального користування та населеними пунктами сільського поселення) найбільш доцільно вважати оптимальними. Якість покриття та дороги 5 категорії (польові другорядні дороги, призначені для перевезення сільськогосподарських земель, майстерень та інших допоміжних майстерень) з найгіршою якістю покриття. Внутрішню дорогу району

віднесено до доріг першої категорії. ПАТ "НТЦ" «КАМАЗ», як дорога 5-ї категорії, ґрунтова дорога у тому ж районі. Відповідно до [86] рекомендовані розрахункові швидкості для доріг 1-ї категорії становлять трохи більше 70 км/год, для доріг 5-ї категорії - трохи більше 30 км/ч. Ці значення швидкості вибрано як максимальне та мінімальне значення швидкості випробування.

При виході з ладу підвіски значення максимальної швидкості коригуються у бік зменшення.

Матриця планування експерименту щодо визначення умов експлуатації амортизаторів має вигляд, поданий у таблиці 3.1. Як фактори, що впливають на умови експлуатації амортизаторів, були обрані:

6 – швидкість автомобіля максимум 70 км/год, мінімум 30 км/год;

Категорія дороги з відповідним знаком мікропрофілю.

Таблиця 3.2

Матриця планування експерименту

№ експ.	6	фактор
1	70	Якість дороги брудна дорога
2	70	задовільна асфальтована дорога Якість
3	тр ид ця ть	брудна дорога
4	тр ид ця ть	задовільна асфальтована дорога Якість

Тест-драйви також проводились на середніх швидкостях. При русі ґрунтовою дорогою максимальна швидкість в ході експерименту обмежувалася швидкісними характеристиками підвіски на цій дорозі, а саме виникненням пробоїв.

Перед проведенням випробувань амортизатори лівої сторони автомобіля спереду та ззаду повинні бути обладнані лазерними датчиками JCS-70/320-485-10-2-24-A для реєстрації миттєвих значень усунення та швидкості руху штанг. Параметри записуються кожні 0,005 с. Параметри записуються та далі обробляються. Під час вимірювань автомобіль рухається із постійною фіксованою швидкістю.

### **3.2. Методика проведення науково-дослідних стендових випробувань**

#### **3.2.1. Цілі та завдання дослідження**

Для визначення відповідності конструкції ARE та її технічних характеристик технічним вимогам та встановлення технічних можливостей необхідно провести серію стендових випробувань щодо визначення значень максимальної потужності, що генерується, та Сили опору в залежності від швидкості руху стрижня.

Основними завданнями проведення експериментально-лабораторних досліджень амортизатора з регенеративним ефектом є:

- Оцінка кількості енергії, що рекуперується ARE;
- Визначення та оцінка демпфуючої сили ARE;
- Оцінка зміни демпфуючих властивостей під час експлуатації при підвищених температурах до  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Верифікація імітаційної моделі ARE. Напрямок

дослідження:

- Провести серію експериментів з різними фіксованими швидкостями переміщення стрижня ARE при кімнатній температурі і записати швидкість переміщення, фазні струми і напруги, що виробляються ARE, струм і напруга на виході перетворювача та блоку управління зарядкою;

Побудувати характеристику згасання АРЕ;

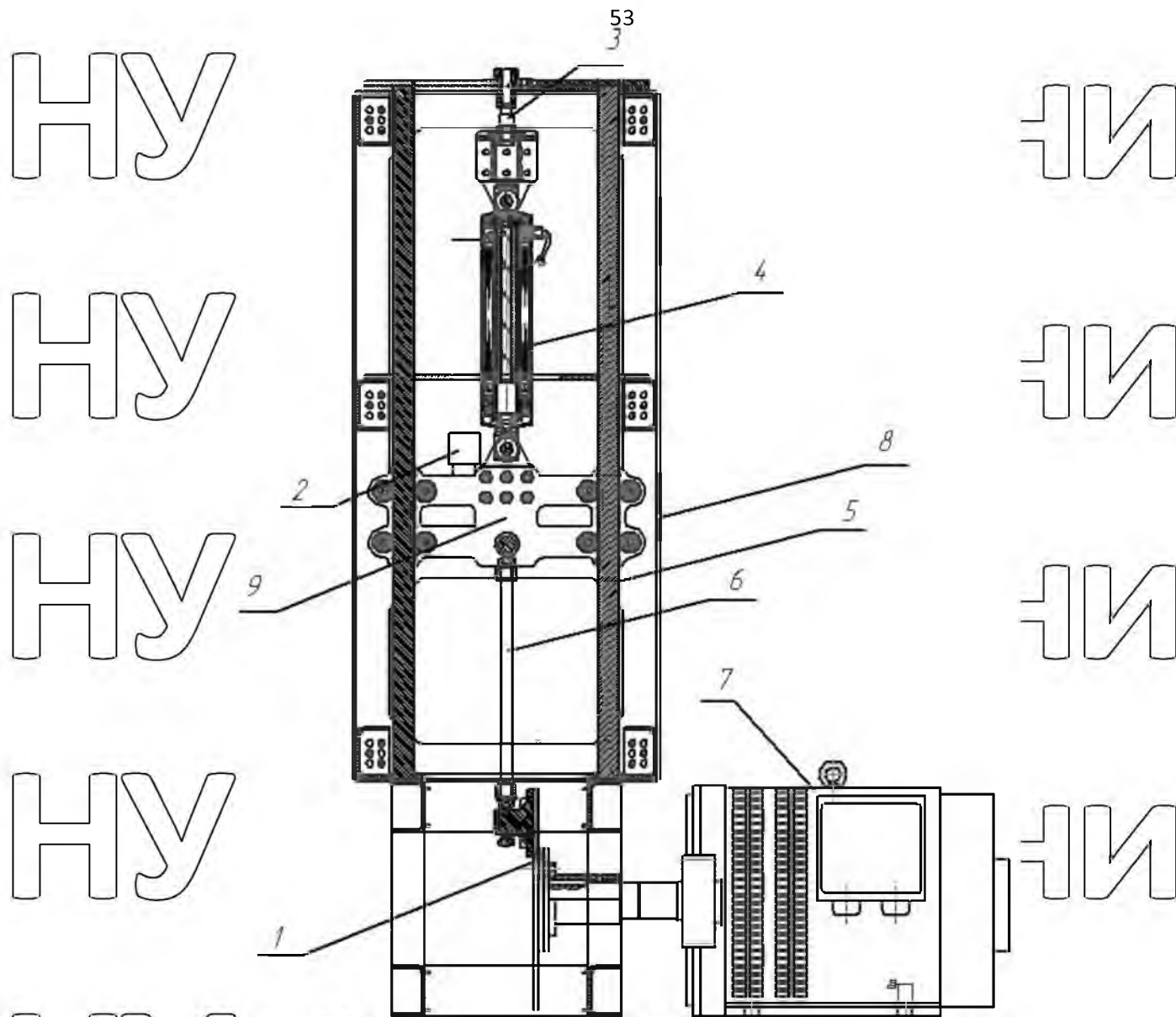
Провести серію дослідів з різними фіксованими швидкостями руху стрижня АРЕ при температурі  $+80^{\circ}\text{C}$  і записати швидкість переміщення, фазні струми і напруги, що виробляються АРЕ, а також струм і напруга на виході АРЕ. перетворювач та блок управління зарядом;

Побудувати характеристику загасання АРЕ за температури  $+80^{\circ}\text{C}$ .

Амортизатор 4 (рисунок 3.6) кріпиться до стійки 8 верхнім вушком через датчик сили розтягування і стиснення 3. Нижня вуха встановлена на рухомій каретці 9, яка переміщається у вертикальному напрямку по лінійних напрямних стійки 5. Це забезпечує вертикальний хід штока. Нижня вуха пов'язана кривошипно-шатунним механізмом 6 через підшипниковий вузол з обертовим диском 1, встановленим на вихідному валу електродвигуна 7.

Змінюючи положення шатунного вуха на диску, можна змінити хід амортизатора. Регульований амортизатор. Змінюючи швидкість валу двигуна, можна змінювати швидкість руху стрижня. На рухомій каретці стійки амортизатора встановлений датчик переміщення 2 фіксує хід штока

амортизатора. При обертанні валу двигуна 7 кривошип приводить в рух рухомий кронштейн 9 і переміщається лінійними напрямними 5, до яких прикріплена нижня вуха амортизатора 4.



1 – диск; 2 – Лазерний датчик відстані; 3 – датчик сили; 4 – АР; 5 – лінійні напрямні; 6 – кривошипно-шатунний механізм; 7 – двигун асинхронний ІД-40; 8 – стійка із датчиками; 9 – рухома каретка Рисунок 3.6 – підставка

Зовнішній вигляд випробувального стенду показано на рисунках 3.7 та 3.8.

НУБІП України

НУБІП України



Рисунок 3.7 Стійка із встановленим амортизатором



Рисунок 3.8 Запис параметрів амортизатора

Регулюванням довжини кривошипа шляхом установки монтажної підшипникового вузла у відповідне гніздо на диску, встановленому на валу двигуна, та зміною частоти обертання двигуна визначають необхідну

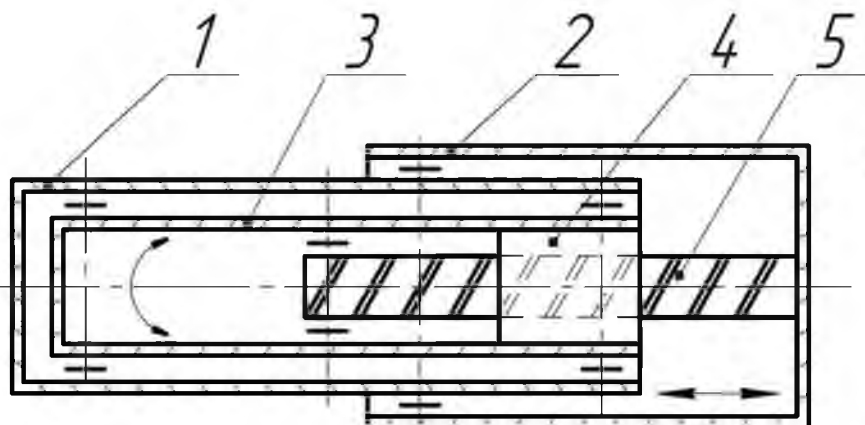
величину ходу штока та швидкість штока амортизатора.

### 3.2.3 Опис конструкції амортизатора, що досліджується.

Об'єктом дослідження є електромагнітне АРЕ. Предметом дослідження є кількісні показники вироблюваної потужності та сили демпфування, що розвивається, при різних швидкостях руху штока.

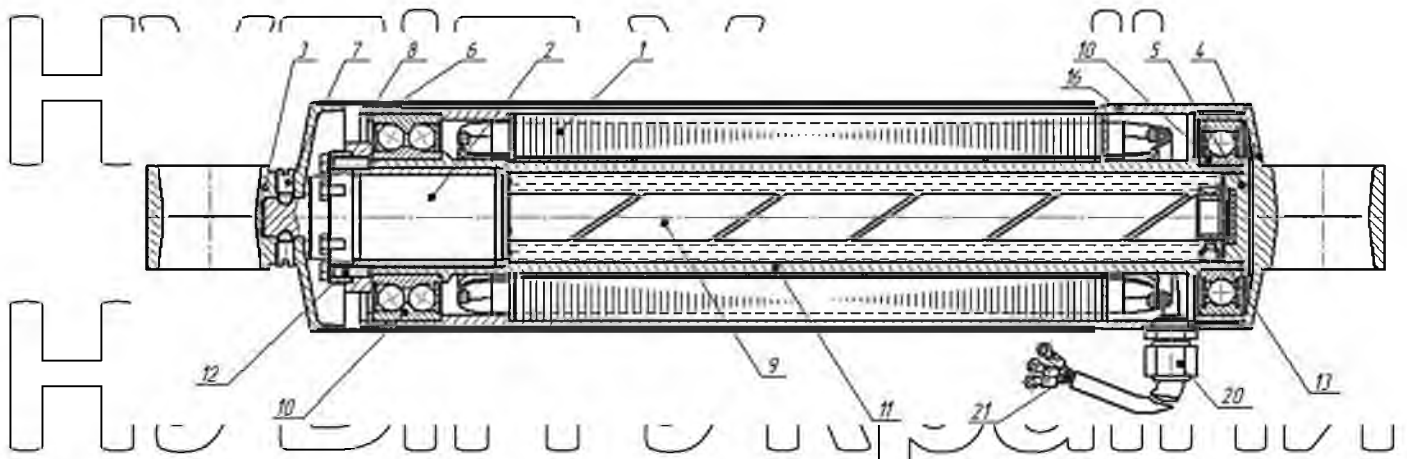
Враховуючи вимоги замовлення на розробку електронної системи управління, що не перевищує габаритів гідравлическої системи управління, використання ШВП має найбільший зміст, оскільки дозволяє досягти великого передатного числа механізму, та забезпечувати задовільну роботу в умовах динамічних впливів у складі підвіски. Вимоги до габаритних розмірів визначалися міркуваннями компоновання та неможливістю модифікації підвіски та пов'язаних з нею систем автомобіля.

На малюнку 3.10 представлена кінематична функціональна схема АРЕ, на малюнку 3.11 – конструкція АРЕ на основі електричної машини, що обертається, і ШВП – поздовжній розріз, а на малюнку 3.12 – поперечний розріз [89].

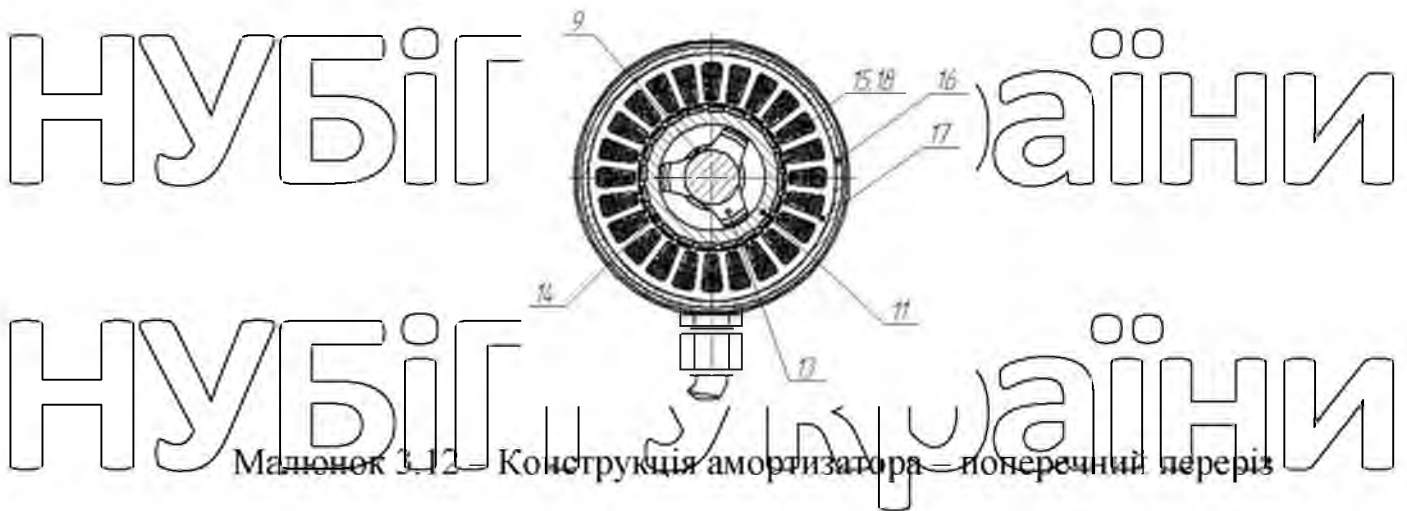


1 – внутрішня трубка, 2 – зовнішня трубка, 3 – порожнистий вал, 4 – гайка, 5 – стрижень із різьбленням.

Малюнок 3.10 – Кінематична функціональна схема



Малюнок 3.11 – Конструкція амортизатора – поздовжній розріз



Малюнок 3.12 – Конструкція амортизатора – поперечний переріз

До верхнього вуха 3 за допомогою кріпильних елементів 7 прикріплена ШВП 9, яка додатково захищена від перекочування. За допомогою вуха у кришці 3 ARE кріпиться до кронштейна, прикріпленого до несучої системи автомобіля. Гайка ШВП 2 встановлена в підлозі валу 11 за допомогою запресування і закріплена кріпильними елементами 12. Вал 11 встановлений в нижній вусі 4 і корпусі статора 16 за допомогою радіально-упорних підшипників 10. Гвинт виготовлений Поворотно-поступальні руху всередині валу до неї порожнім валом. Нижній вушок призначений для кріплення ARE в кронштейні, розташованому на напрямному елементі підвіски автомобіля. На верхньому вуху 3 встановлена трубка 8. На кінці гвинта закріплена нульова прокладка 13, що забезпечує співвісність порожнистого валу і стрижня гвинта при їх взаємному русі. Для зменшення сили тертя внутрішня порожнина порожнистого валу заповнена мастилом. Кільце ущільнювача 6 забезпечує герметичність АР. На зовнішній стороні порожнистого валу 11 по всій довжині є пази, в яких встановлені постійні магніти 14. Магніти



встановлені таким чином, що намагнічування напрямки сусідніх магнітів чергуються. Порожнистий вал із постійними магнітами, що обертається за рахунок зворотного-поступального руху ШВП, утворює ротор генератора АРЕ.

Статор генератора 1 розташований усередині статора корпусу.

Сердечник статора формується шляхом установки корпусу статора 16 статорних пластин 17, утворюють пази 18 для обмоток 15 генератора. Трифазна обмотка укладена в пазах сердечника за схемою "зірка", де кожен стрижень зірки складається з восьми котушок, з'єднаних послідовно. Вихідні кінці обмоток розташовані в нижній частині АР навпроти отвору 19, яке встановлено кабельний введення 20 для герметичного виходу вихідного кабелю 21 з корпусу АР. Технічні характеристики досліджуваних АРЕ наведено у додатку Б.

На малюнку 3.13 представлено електричну схему з'єднання зіркою обмоток статора АРЕ, а на малюнку 3.14 показані основні габаритні розміри АРЕ

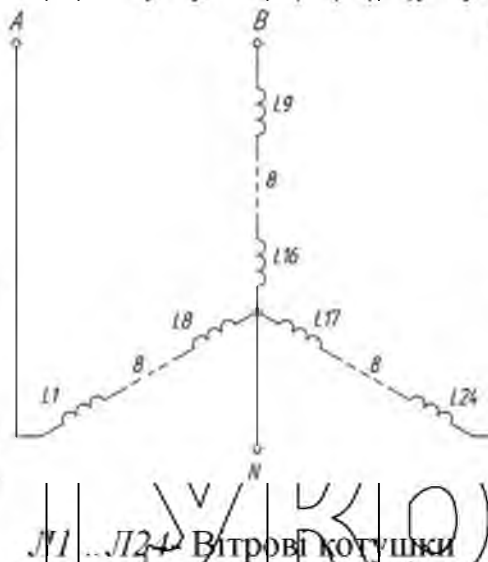
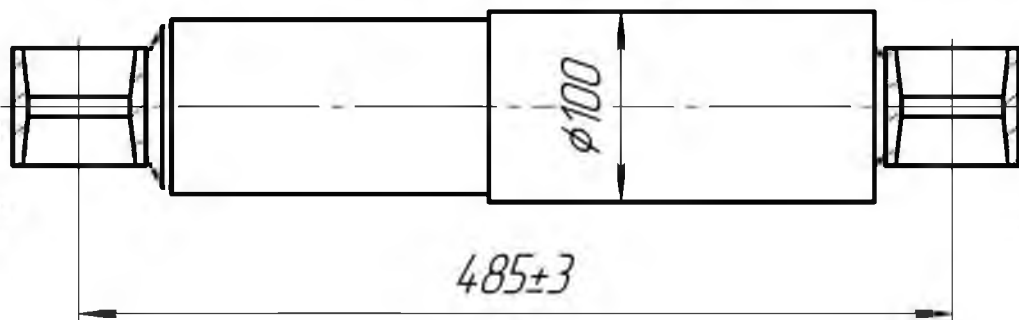


Рисунок 3.13 – Принципова схема підключення статора обмотки



## Рисунок 3.14 – Основні габаритні розміри АРЕ

Вимірювальні та запикувальні пристрої

У рамках дослідження було зібрано такі дані:

- Електричний струм та напруга, що генеруються АРЕ;
- Струм та напруга зарядки акумулятора на виході блоку БУЗ;
- АРЕ відновила подачу електроенергії;
- переміщення та швидкість переміщення стрижня АРЕ;
- Демпфуюча сила на стрижні АРЕ.

До складу вимірювальної системи стенду увійшли наступні

вимірювальні прилади та датчики:

- Датчик струму LA25-НП, 4 шт.
- Датчик напруги CV3-2000, 2 шт.
- Лазерний датчик LC5-70/320-485-10-2-24-A, 4 шт.
- Датчик сили розтягування та стиснення TX25-T2, 2 шт.
- Вимірювальний перетворювач напруги E14-440.
- Вимірювально-обчислювальний комплекс МПК-036.
- Влантування контролю параметрів повітря МЕС-200А.

## 3.2.5. Процедури та методи стендових випробувань

Перед проведенням стендових випробувань АРЕ витримували у кліматичній камері при температурі  $+20^{\circ}\text{C}$  протягом 3 годин. Для дослідження залежності сили демпфуючої від зміни робочих температур АРЕ витримували в кліматичній камері при температурі  $+80^{\circ}\text{C}$  протягом трьох годин. Потім АРЕ було встановлено на стенді з урахуванням необхідного ходу.

Електродвигун 7, з'єднаний з диском 1, задає різні швидкості і швидкість лінійного переміщення штока амортизатора 4 (рис. 3.6). Амортизатор встановлений верхнім нерухомим вушком у тримачі, на якому закріплений лазерний датчик; Нижня вуха закріплена в рухомій каретці 9. Шатун 6, закріплений на провідному шківі, встановленому на електродвигуні, переміщає каретку вертикальним напрямком. Змінюючи положення нижнього кронштейна шатуна і змінюючи швидкість обертання валу двигуна, регулюють хід шатуна та швидкість каретки зі з'єднаним з нею

штоком амортизатора. В ході експерименту нижня балка шатуна переміщається диском зі швидкостями вертикального переміщення 0,2; 0,5; 0,8; 1,0 м/с.

Вимірювальна система штатива дозволяє реєструвати електричні та механічні параметри. Наступна обробка вихідних даних визначає силу опору, середню і максимальну потужність, що рекуперується, і швидкість штока амортизатора. За реєстрацію сигналів з вимірювальних датчиків випробувального стенду відповідає вимірювально-обчислювальний комплекс МІК-036, що містить модуль роботи з тензорезисторами та модуль вимірювання напруги та постійного струму. Матриця планування лабораторних експериментів представлена у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 - Матриця планування лабораторних експериментів

Швидкість штока, м/с	Водотоннажність, мм	температура, °С
0,2	20	+20
0,5	50	
0,8	80	
1,0	100	
0,2	20	+80
0,5	50	
0,8	80	
1,0	100	

При різних швидкостях руху штока амортизатора, створюваного електродвигуном, реєструються фазні струми  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  і напруги  $U_{ab}$ ,  $U_{ac}$ ,  $U_{bc}$ , створювані АРЕ як при ході стиснення, так і при відбої. Записуються значення зарядного струму акумулятора та напруги акумулятора, що формуються контролером заряду БУЗ (рисунок 3.5). За один оберт валу електродвигуна відбувається повний робочий цикл амортизатора, що складається з тактів стиснення та відбою. При цьому швидкість штока змінюється від нуля до максимального заданого значення за синусоїдальним законом (позитивні значення відповідають ходу стиснення, негативні значення відповідають ходу відбою).

### 3.3 Методика випробувань комплекту амортизаторів регенеративної дії у складі транспортного засобу

#### 3.3.1 Цілі та завдання дослідження

Основними завданнями експериментальних досліджень комплекту АРЕ у складі колісної машини є:

Оцінка функціонування СЕД, що складається з комплекту АРЕ, трансформаторів струму для управління АРЕ та зарядного пристрою під час роботи у складі транспортного засобу при русі різними дорогами з різною швидкістю;

– Визначення значень пікової та середньої електричної потужності, що відновлюється, СЕД з АРЕ при русі автомобіля з різною швидкістю по різних дорогах;

– Моніторинг процесу заряджання накопичувача енергії.

Цілями дослідження є:

– Підготувати об'єкт дослідження шляхом оснащення автомобіля СЕД, що складається з комплекту АРЕ, силових перетворювачів та блоку керування зарядом накопичувачів, а також системи збирання даних;

– Провести експериментальні поїздки автомобіля різними дорогами з різними фіксованими швидкостями.

– Контролюйте процес заряджання накопичувача енергії.

#### 3.3.2 Предмет дослідження

Для проведення дослідницьких випробувань на транспортному засобі, зовнішній вигляд якого показано на малюнку 3.15, а габаритні розміри якого показано на малюнку 2.1 було встановлено комплект амортизаторів з регенеративним ефектом.



Малюнок 3.15 – Зовнішній вигляд автомобіля

Транспортний засіб приводиться в рух синхронним тяговим електродвигуном з збудженням від постійних магнітів, що відповідає планетарній передачі, з'єднаної через кардану передачу з конічною головною передачею провідного моста, що приводить в рух задні колеса.

Тяговий двигун управляється перетворювачем потужності. Як джерело енергії на автомобілі встановлена високовольтна тягова літій-залізо-фосфатна батарея, що складається з двох акумуляторних контейнерів, з'єднаних послідовно. Акумулятор живить тягові двигуни та решта споживачів на борту. На борту є зарядний пристрій для заряджання.

Автомобіль також оснащений додатковим низьковольтним свинцево-кислотним акумулятором для первинного введення в експлуатацію та можливої компенсації піків енергоспоживання у низьковольтній електричній мережі. Автомобіль має компресор для живлення пневмосистеми та насос гідропідсилювача рульового керування з електроприводом.

У таблиці 3.5 наведено основні технічні характеристики дослідженого автомобіля.

Таблиця 3.5 - Основні технічні характеристики досліджуваного автомобіля

параметр	Значення
Загальна вага, кг	11900

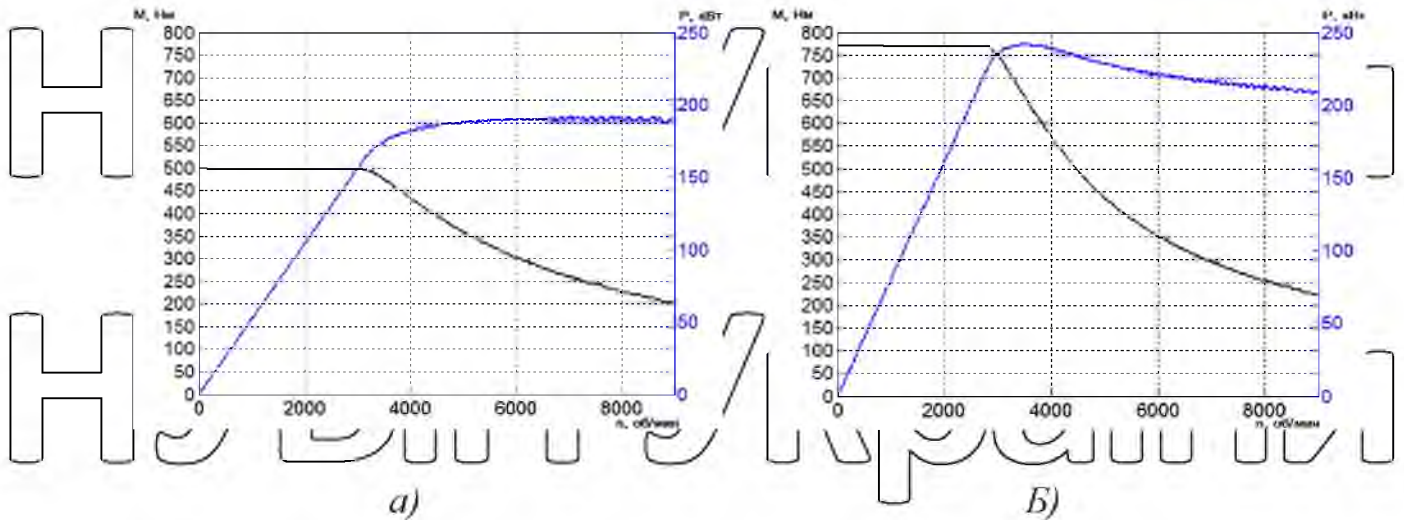
Порожня вага кг	6020
Габаритні розміри, довжина x ширина x висота стільники, мм	7400x2550x3400
Максимальне навантаження на передню вісь, кг	4350
Максимальне навантаження на задню вісь, кг	7550
Максимальна швидкість, км/год	90
Максимально переборний ухил, %	20
колісна формула	4x2
тип приводу	Електричний
Тип тягового двигуна	Синхронне із збудженням постійними магнітами
Максимальна довготривала/короткочасна потужність, кВт	150/230
Максимальний довготривалий/короткочасний крутний момент, Н·м	550/760
Передатне число головної передачі/відповідна коробка передач	4,78 / 3,00
розмір колеса	245/70R19,5
Максимальний запас ходу, км	25

Характеристики тягового електродвигуна наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 Параметри тягового двигуна

параметр	Значення
Максимальний момент, Н·м	760
Максимальна потужність на валу, кВт	245
Номинальний крутний момент, Н·м	500
Номинальна потужність на валу, кВт	157
Момент інерції ротора, кг·м <sup>2</sup>	0,102
Активний опір фази статора, Ом	0,0175
Індуктивність обмотки статора осі d, мГн	0,004057448
Індуктивність статора обмотки по осі d, мГн	0,000652
Потокозчеплення постійних магнітів, Вб	0,291
Вага, кг	86,5

На рисунках 3.16 показано механічні властивості двигуна.



А- номінальний режим; б Короткочасний режим Рисунок

### 3.16 – Механічні властивості тягового двигуна

Параметри тягової батареї, встановленої на транспортному засобі, наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Характеристики тягової батареї

параметр	Значення
Енергоємність, кВтг	26,6
Номінальна напруга,	650
Максимальна напруга,	547
Місткість акумулятора, А·ч	40
Внутрішній опір, мОм	240 - 280

Під час виробувань автомобіль був завантажений на 50%. Загальна вага автомобіля під час дослідження становила 8960 кг. У реальних умовах експлуатації сільськогосподарські машини та трактори зазвичай виконують

транспортні операції у два етапи: рух порожнього автомобіля без вантажу до місця навантаження, рух завантаженого автомобіля до місця розвантаження.

У першому випадку енергія, що рекуперується, вийде через збільшення маси транспортного засобу, у другому випадку вона нижче з тієї ж причини при тій же швидкості [30].

Оскільки основною метою дослідження є підвищення ефективності процесів транспортного машинобудування в сільському господарстві, а саме зниження витрат енергії або палива при використанні СЕД, підхід, який полягає в оцінці руху завантаженого транспортного засобу по всьому маршруту на 50%, виправданий. 1 дозволяє досягти адекватних

результатів. Такий підхід використовується під час аналізу паливної ефективності чи визначенні питомої витрати енергії на рух транспортного

засобу.

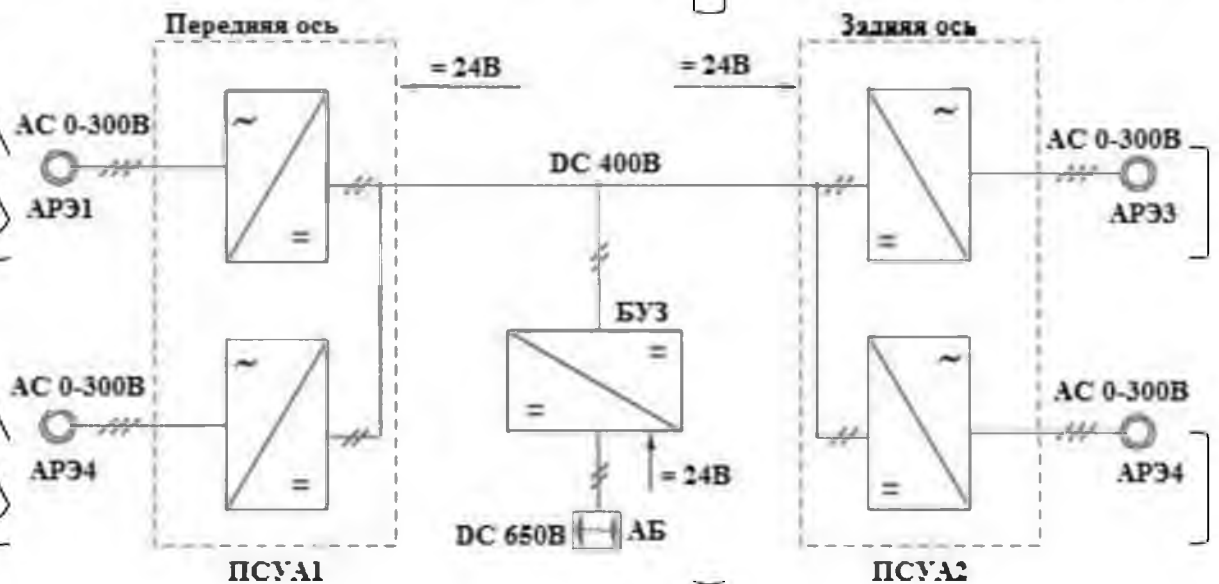
БЕДП автомобіля (рис. 3.17) містить такі компоненти:  
чотири амортизатори регенеративної дії, по одному на кожне колесо.

Кожна АРЕ включає трифазний синхронний генератор з постійними магнітами, позначений на схемі АРЕ1 ... АРЕ4. АРЕ це телескопічні електромагнітні амортизатори подвійної дії, які встановлюються на кожне колесо автомобіля. Нижня вушко АРЕ кріпиться до кронштейна опори переднього моста або провідного заднього моста, верхня - в кронштейні, прикріпленому до опорної системи сайлентблоками;

два перетворювачі з управлінням амортизаторами (ПСУА1 - передній міст та ПСУА2 - задній міст), по одному на передній та задній міст автомобіля. PSUA управляє двома генераторами АРЕ.

- Пристрій керування зарядкою БУЗ для заряджання високовольтної батареї або іншого накопичувача енергії;

- Блок управління зарядкою БУЗ 24В для заряджання низьковольтного акумулятора.



Малюнок 3.17 Блок-схема системи

Щоб забезпечити необхідні характеристики демпфування під час відбою, паралельно амортизатору встановлені гідравлічні амортизатори з регенеративним ефектом. Ці амортизатори не приймають опору під час такту стиснення, оскільки не мають відповідної системи клапанів. Демпфування відскоку - це різниця між тим, що потрібно, і тим, що забезпечує



регенеративний шок. При швидкості штока до 0,17 м/с при відбої сила становить від 850 до 1550 Н, при швидкості штока 0,52 м/с сила - від 2540 до 3560 Н. Під час такту стиснення сила дорівнює 0 Н. На малюнку 3.18 показаний зовнішній вигляд демпфуючого вузла на правому передньому колесі. Зовнішній вигляд вузла гасіння вібрації однаковий всім коліс.

Використання такого підходу дозволяє підвищити продуктивність автомобіля за рахунок дублювання пристроїв.



1 – амортизатор із регенеративним ефектом; 2 – ослаблений гідроамортизатор

Малюнок 3.18 – Зовнішній вигляд вузла, що демпфує.

На малюнку 3.19 показаний зовнішній вигляд ослабленого гідроамортизатора, встановленого паралельно ARE для забезпечення необхідної сили демпфування під час віддачі. На малюнку 3.20 показано зовнішній вигляд ARE.

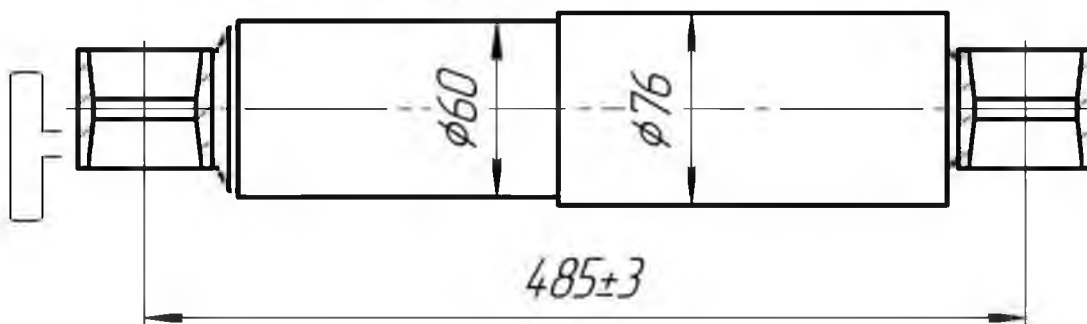


Рисунок 3.19 – Гідралічно ослаблений амортизатор



а) стислий стан АРЕ, б) розтягнутий стан АРЕ. Малюнок 3.20  
Зовнішній вигляд амортизатора з регенераційним ефектом

Крім АРЕ для виконання функцій рекуперації енергії машина була оснащена інверторами із системою керування та електронними пристроями керування безпосередньо для заряджання. Перетворювачі потужності та блок управління зарядної розташовувалися в салоні автомобіля (рис. 3.21). Також був персональний комп'ютер та вимірювальний комплекс із блоком системи вимірювань для проведення вимірювань.

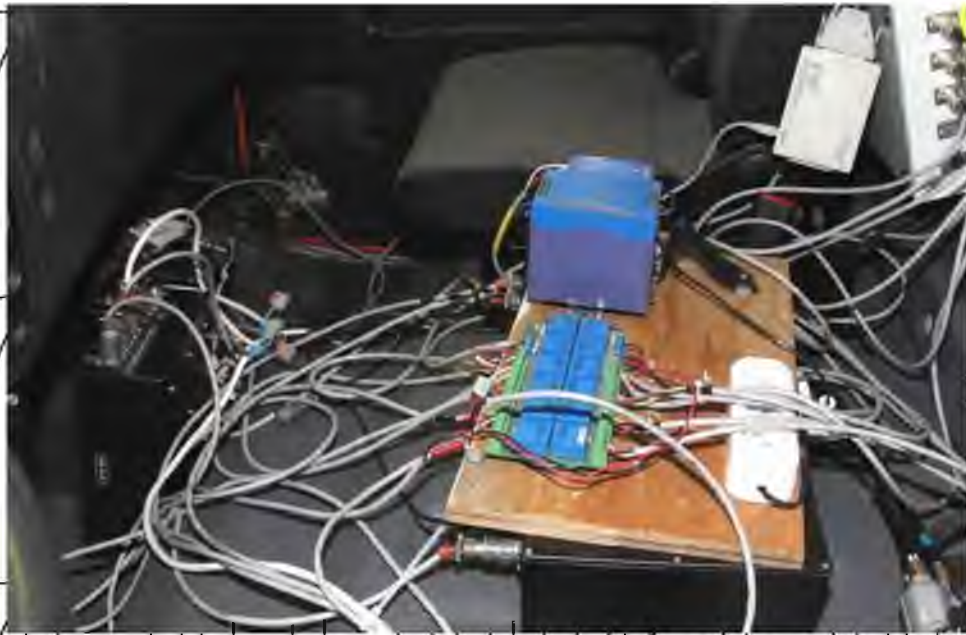


Рисунок 3.21 – Система управління системою налаштування та вимірювання APE

Трифазна змінна напруга, що виробляється в генераторах APE1...APE4 при вертикальному переміщенні штока при русі по нерівних дорогах, надходить на випрямлячі ВМ (рисунок 3.22) силових перетворювачів управління амортизаторами ПСУА1 від APE1 і ARE3 - амортизатор переднього заднього моста, де воно перетворюється на пульсуючу напругу постійного струму. Потім випрямлену напругу надходить на блок підвищення напруги БНН. У блоках BQND5 напрямок руху стрижня визначається шляхом контролю чергування фаз генератора, а швидкість розраховується виходячи з частоти напруги, що генерується. За певним напрямком руху та швидкості стрижня силовий перетворювач визначає необхідний струм навантаження та регулює його шляхом зміни коефіцієнта заповнення ШИМ вмикача. Кожен APE управляється незалежно. Виходи блоків БНН об'єднуються та підключаються до входу блоку БУЗ. Блок управління зарядкою БУЗ являє собою перетворювач, що підвищує, навантаженням якого є тяговий акумулятор. При необхідності підзарядки низьковольтного акумулятора заряджання здійснюється через блок керування зарядкою БУЗ 24В. Ця властивість може бути використана при використанні СЕД у сільськогосподарських машинах та тракторах, що не мають електроприводу та високовольтного джерела енергії.

### 3.3.3 Вимірювальні та записувальні пристрої

У рамках дослідження було зібрано такі дані:

- Електричний струм та напруга, що виробляються кожним АР;
- Напруга та струм на вході блоку управління зарядкою БУЗ тягового акумулятора;

- Струм та напруга зарядки акумулятора на виході блоку БУЗ;

Рух та швидкість переміщення стрижня АРЕ. Електрична потужність, що повертається СЕД накопичувач енергії, визначається шляхом обробки записаних даних. До блоку вимірювальної системи увійшли вимірювальні прилади та датчики, аналогічні вимірювально-реєструючим пристроям, що застосовуються в лабораторних дослідженнях.

### 3.3.4 Процедури та методи випробувань

Перед випробуванням автомобіль повинен бути обладнаний комплектом регенеративних амортизаторів на кожному колесі, комплектом перетворювачів потужності, по одному на вісь, контролером заряду для накопичення енергії в акумуляторі та акумуляторною батареєю. Усі компоненти автомобіля мають бути в ідеальному стані.

Електрична потужність, що рекуперується амортизатором, оцінюється за сигналами датчиків струму та напруги на виході силових перетворювачів, що управляють електроамортизуючими машинами. При проведенні випробувань необхідно за допомогою системи збору даних записати серію даних з метою їх подальшої обробки та визначення максимальної та середньої електричної потужності, що відновлюється, СЕД при русі автомобіля по випробувальних дорогах і при мінімальних і максимальних значеннях швидкості, аналогічно наведеному у розділі 3.1. Під час вимірювань автомобіль рухається із постійною фіксованою швидкістю. Відстань, яку має подолати електромобіль, повинна становити щонайменше 1 км.

Матриця плану експерименту для визначення середньої потужності, що відновлюється, має форму, показану в Таблиці 3.8. Як чинники, що впливають на значення потужності  $u$ , що відновлюється СЕД, були обрані наступні фактори:

- $v$  – швидкість автомобіля максимум 70 км/год, мінімум 30 км/год;

*x<sub>ср</sub>* - Середня висота нерівностей дороги, максимальне значення 96 мм (грунтова дорога), мінімальне значення 9,5 мм (асфальтована дорога задовільної якості).

Таблиця 3.8 - Матриця планування експерименту

№ експ.	фактори	
	<i>v</i> , км/год	<i>x<sub>ср</sub></i> , мм
1	70	110
2	70	9,5
3	тридцять	110
4	тридцять	9,5

Залежність кодованих змінних факторів впливу від натуральних представлена у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 Залежність кодованих змінних від натуральних

фактор	Макс	Мінімум	Вийти заміж	$\Delta$	Шукає
<i>v</i>	70	тридцять	50	20	$x_1 = \frac{v - 50}{20}$
ГОДИ На Вийти заміж	110	9,5	59,75	43,25	$x_2 = \frac{h - \text{Середній}}{59,75 - 50,25}$

### Розділ 3. Висновки

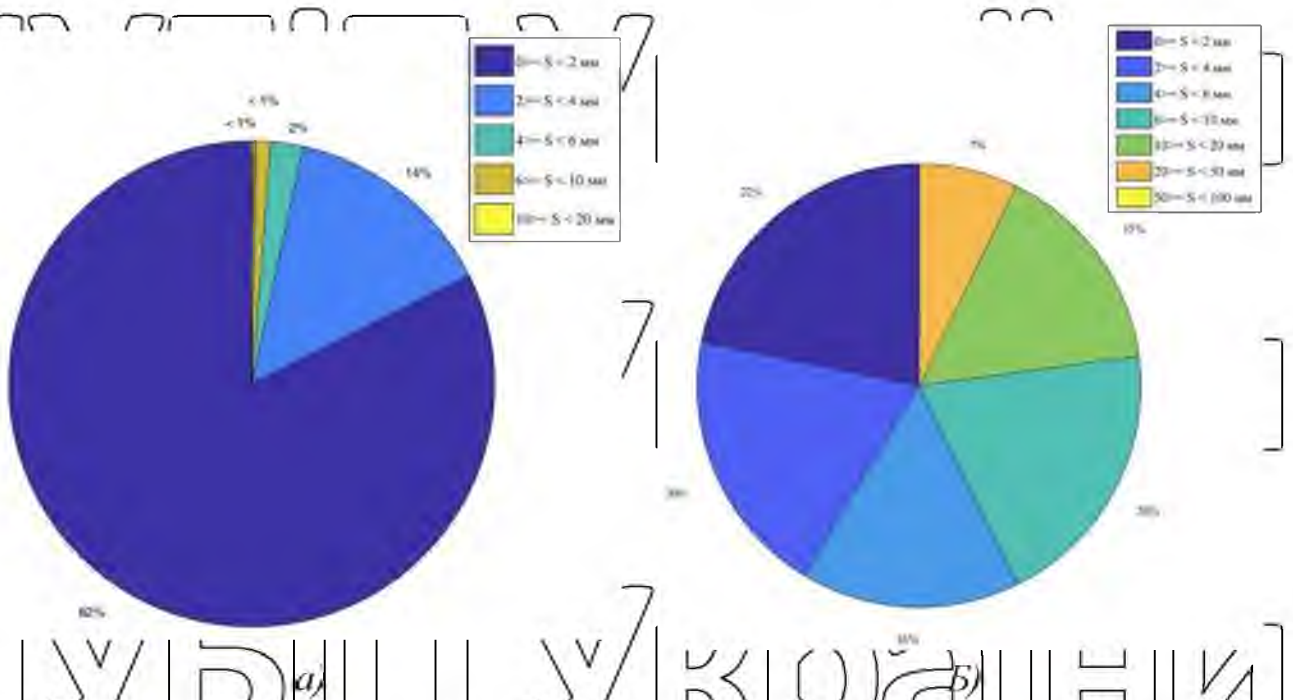
У цьому розділі представлена методика послідовних вивчення комплекту АРЕ у складі транспортного засобу, одиночного АРЕ при проведенні стендових досліджень, а також методика визначення найбільш типових режимів роботи ЕД.

Для того, щоб пред'являти обґрунтовані вимоги до ЕРА у складі систем підвіски та враховувати особливості роботи ЕРА у складі автомобіля, необхідно вивчити роботу амортизаторів. У ході дослідження необхідно визначити найбільш типовий і найпоширеніший режим у роботі. Перевірка роботи АРЕ на відповідність технічним вимогам технічного завдання на даний компонент здійснювалася за допомогою лабораторних досліджень, які полягали у реєстрації електричних та механічних параметрів роботи при фіксованих швидкостях переміщення стержня АРЕ на стенді.

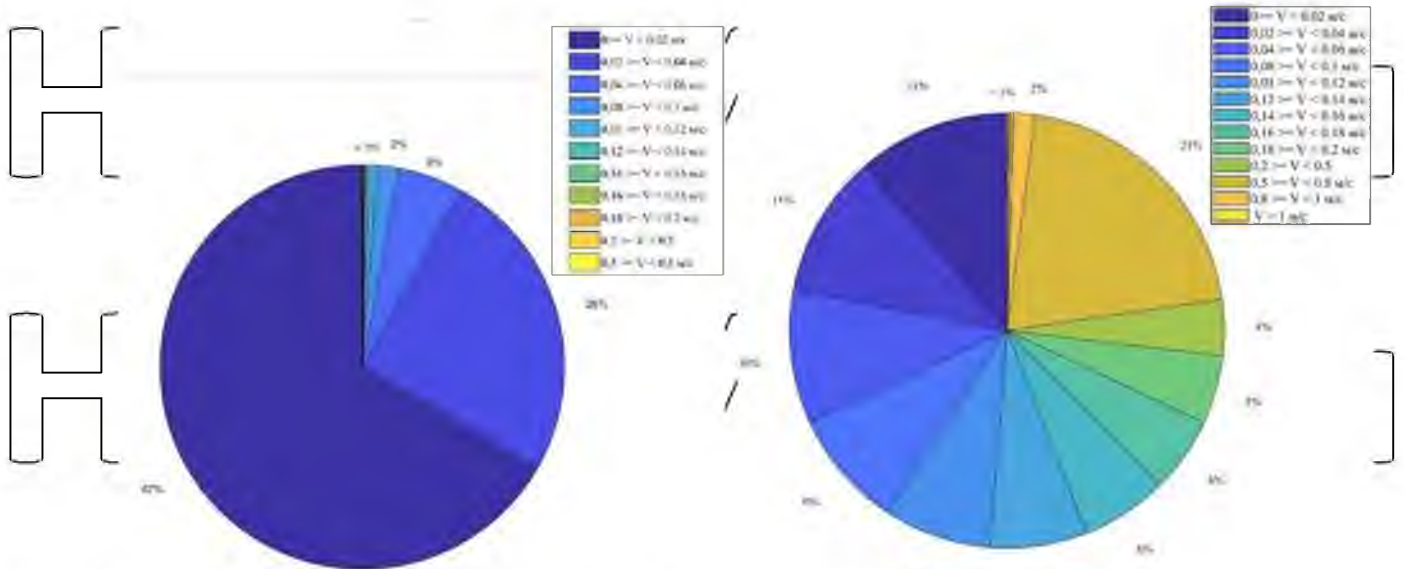
## 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ АМОРТИЗАТОРІВ З РЕГЕНЕРАТИВНИМ ЕФЕКТОМ

### 4.1 Аналіз результатів дослідних випробувань умов експлуатації амортизаторів

Дослідження щодо визначення умов роботи амортизаторів у складі вантажного автомобіля проходилися на вантажному автомобілі, зовнішній вигляд якого представлений на малюнку 3.1, технічні характеристики – у таблиці 3.1. Під час реєстрації транспортний засіб рухався у транспортному потоці та зі швидкостями відповідно до розділу 3.1. Забіги також проводилися на середній швидкості зі стрільбища. У додатку А представлені результати випробувань, а на рисунках 4.1 та 4.2 показані відсотки виникнення зсувів штока амортизатора та швидкості від загального часу руху.



А – Рух асфальтом, б Рух ґрунтовими дорогами Рисунок 4.1 – Розподіл рухів штока амортизатора



А) Рух асфальтом, Б) Рух ґрунтовими дорогами Рисунок 4.2  
— Розподіл швидкостей штока амортизатора

У таблиці 4.1 представлені результати обробки експериментальних даних автоперелонів [94]. У таблиці зазначено  $S_{ав}$  - середнє переміщення штока під час руху,  $S_{max}$  - максимальне переміщення штока під час руху,  $V_{max}$  - максимальна швидкість штока під час руху і  $V_{ав}$  - середнє значення швидкості штока під час руху,  $a_{max}$  - максимальне прискорення штока під час руху,  $a_{ср}$  - середнє значення прискорення стрижня у період прибуття.

Таблиця 4.1 Результати обробки експериментальних даних при тест-драйвах одиночного автомобіля

режим Рух	$S_{ав}$ , мм	$S_{max}$ , мм	$V_{max}$ , м/с	$V_{ав}$ , м/с	$A_{Макс}$ ,	$A_{Вийти}$ замк, Г
Асфальт, 30 км/год	$17,6 \cdot 10^{-5}$	20	0,40	0,020	2,5	0,13
Асфальт, 50 км/год	$25 \cdot 10^{-5}$	23	0,41	0,030	2,1	0,16
Асфальт, 70 км/год	$29 \cdot 10^{-5}$	23	0,50	0,038	2,7	0,19



Таблиця 4.1 (продовження)

Режим водіння	$S_{ав}$ , мм	$S_{max}$ , мм	$V_{max}$ , м/с	$V_{ав}$ , м/с	$A_{Макс}$ , Г	$A_{Витти}$ заміж, Г
Грунтова дорога, 30 км/год	38,5 * 10-5	88	2,48	0,110	13.4	0,59
Грунтовий Дорога, 45 км/год	23,6 * 10-4	78	1,54	0,130	23,0	0,64
Грунтовий Дорога, 60 км/год	22*10-4	47	1,26	0,148	6.4	0,74

Аналіз експериментальних даних показує, що основними особливостями, що впливають на вибір конструкції ЕПС для вантажних автомобілів, є те, що більшість часу робота становить 87-99% при постійних середніх переміщеннях не більше 0,5-1 мм при малих швидкостях штока (до 0,2) м/с), з періодичними «сплесками» швидкості штока до 1,5 – 2,5 м/с із переміщеннями до 80 – 90 мм, близькими провалами підвіски, що характеризуються великими динамічними навантаженнями (до 20 г) на підвіску. елементи.

#### 4.2 Рекомендації щодо конструкції амортизатора

При проектуванні АРЕ необхідно вибрати номінальний розрахунковий режим роботи ЕД зі швидкістю обертання або швидкістю лінійного переміщення, що відповідає швидкості руху стрижня, до 0,2 м/с і домогтися організації швидкої зміни магнітного поля. потік у повітряному заворі. У цих режимах роботи важливо забезпечити максимально можливу конструктивну ефективність. Оскільки всі підвісні вузли піддаються підвищеному впливу пилу та вологи, необхідно проектувати конструкцію з пінополістиролу з рівнем пиловологозахисту не нижче IP 67.

За результатами аналізу експериментальних даних АРЕ піддається великим динамічним ударам, тому конструкція має витримувати динамічні удари від нерівностей дороги із прискореннями до 20 g – група механічного виконання М30. АРЕ повинен мати високі показники як питомої потужності

(не менше 1,0 - 1,5 кВт/кг), сили (не менше 700 - 1000 Н/кг) та питомої питомої потужності (не менше 6,8 - 7,2 кВт/л) та сили (не менше 2500 - 3000 Н/л). Для задоволення цих вимог необхідно використовувати у конструкції синхронні генератори з постійними магнітами з високими значеннями залишкової індукції та коерцитивної сили.

Зважаючи на особливості роботи амортизатора при ударах, що розтягують і стискають, у протилежних напрямках необхідно забезпечити односпрямований рух рухомих частин (ротора або транслятора), що у свою чергу знижує інерцію АРЕ (рисунок 1.11). З цією метою конструкції рухливих частин АРЕ слід проектувати так, щоб вони мали мінімально можливий момент інерції при збереженні необхідної міцності.

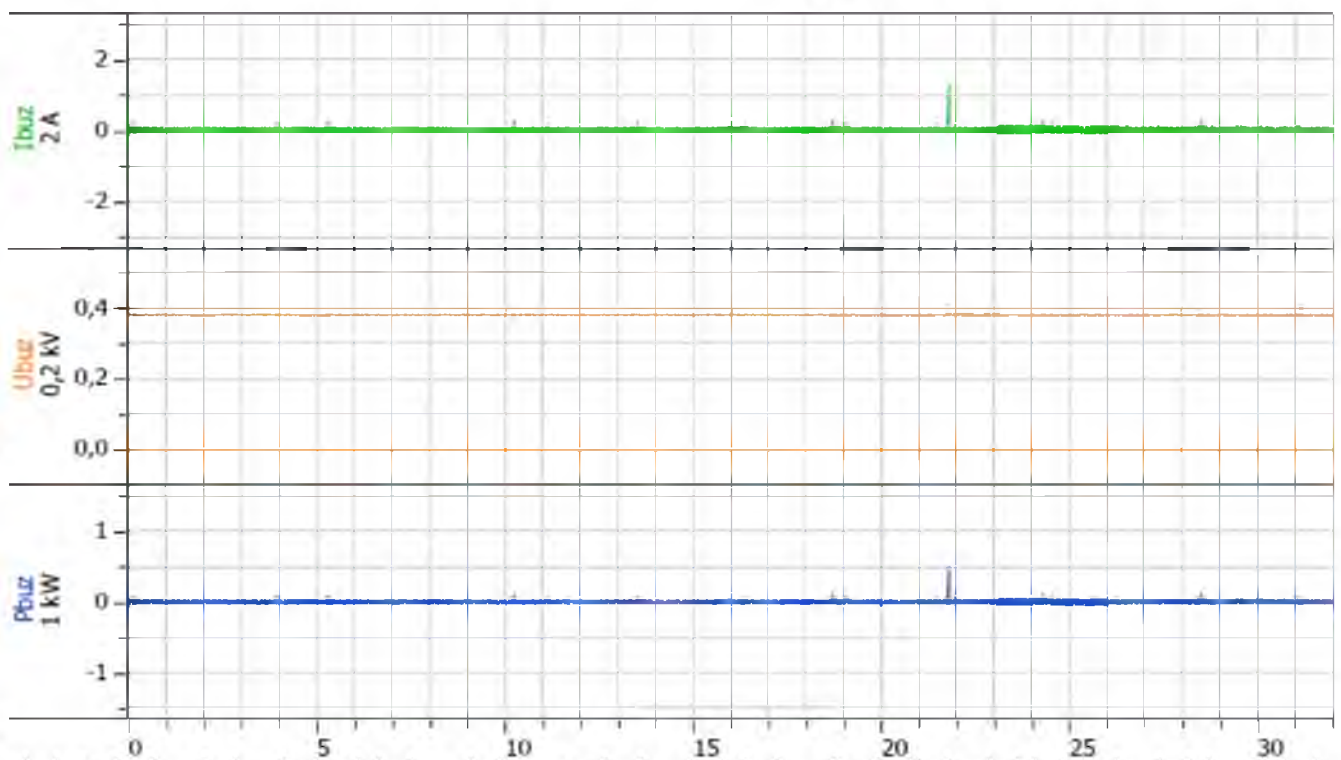
На основі аналізу рівняння динамічної рівноваги статора (29) слід, що потужність, що відновлюється, і характеристики демпфування прямо пропорційні зміні потোকосцеплення (частини магнітного потоку, пов'язаної з обмотками статора). Чим більше значення похідної магнітного зв'язку в часі, тим більше напруга на фазах. Одним із способів збільшення похідного магнітного зв'язку за часом є збільшення числа витків фазної обмотки. Однак у цьому випадку збільшується і опір фазної обмотки. Крім того, чим більше витків, тим нижче коефіцієнт заповнення паза міддю через велику кількість ізоляції. Тому фазовий опір збільшується швидше, ніж похідна магнітного зв'язку. Збільшити швидкість зміни потোকосцеплення можна за рахунок зменшення кроку полюсів при одночасному збільшенні кількості пазів для розміщення фазної обмотки, що також призводить до збільшення фазного опору. За рахунок збільшення швидкості руху постійних магнітів щодо обмоток статора безпосередньо збільшується швидкість зміни магнітного поля та потোকосцеплення. Для збільшення швидкості руху постійних магнітів необхідно використання механічних проміжних ланок, наприклад перетворення поступального руху в обертальне.

### 4.3 Аналіз результатів дослідних випробувань комплексу амортизаторів у складі транспортного засобу

У ході тестових запусків здійснювалися захоплення та запис значень сигналів від датчиків струму та датчиків напруги на виходах блоків БПУА та БУЗ функціональної схеми (рисунок 3.18).

Перегони проводилися з фіксованими швидкостями дорогою згідно з матрицею планування експерименту, наведеною в таблицях 3.8, 3.9 пункту 3.3.

В результаті математичної обробки записаних сигналів було розраховано пікові та середні показники відновленої електричної потужності комплексу АРЕ. На рисунках 4.9 – 4.14 показані залежності струму  $I_{буз}$  та напруги  $U_{буз}$  на виході БУЗ, що заряджає акумулятор, та значення миттєвої електричної потужності зарядки  $P_{буз}$  (показані перші 32 секунди руху).



Малюнок 4.9 – Осцилограми струмів і напруг під час руху автомобіля зі швидкістю 30 км/год асфальтованою дорогою

НУБІП України

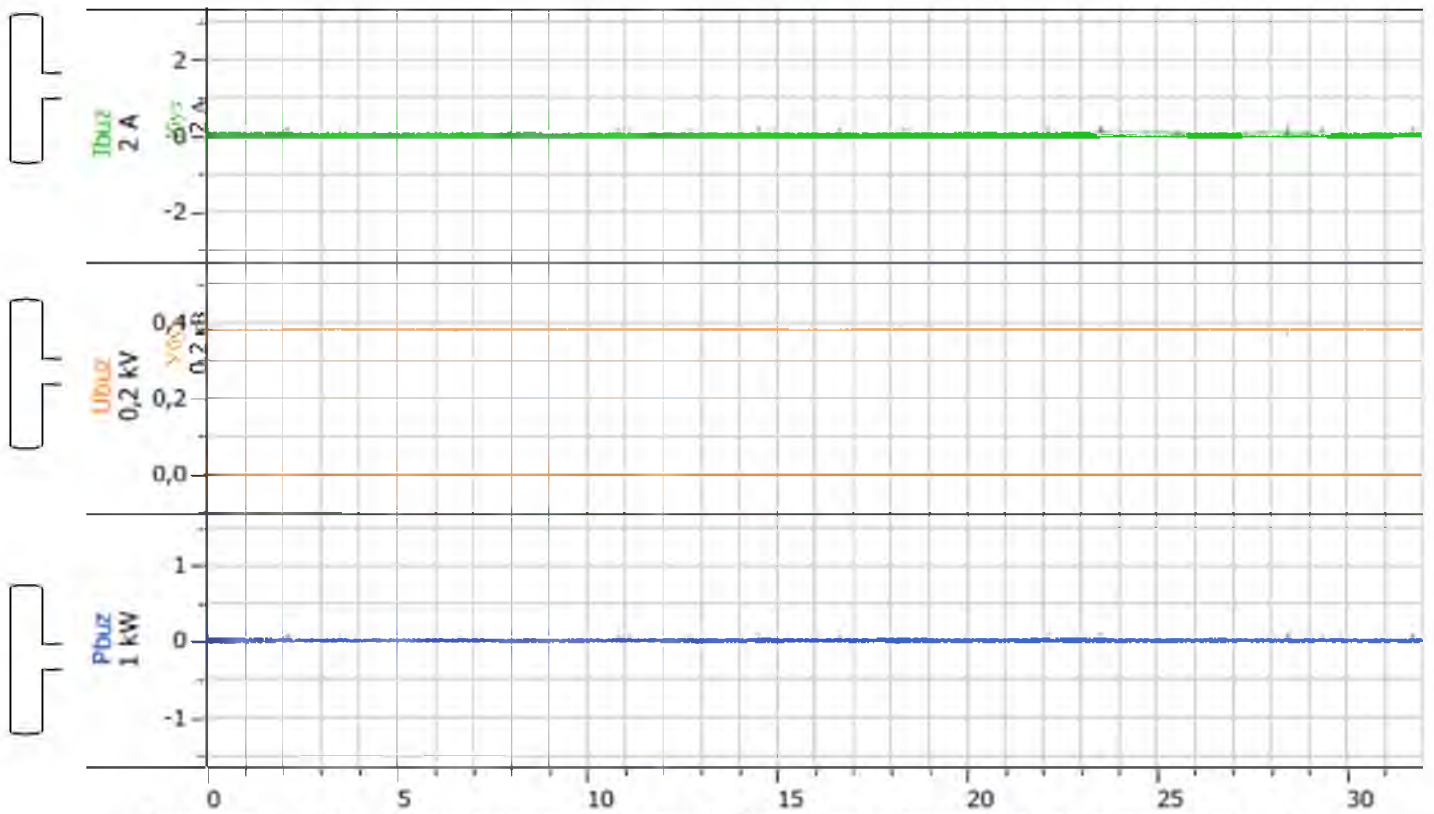


Рисунок 4.10 – Осцилограми струмів і напруг під час руху автомобіля зі швидкістю 50 км/год асфальтованою дорогою

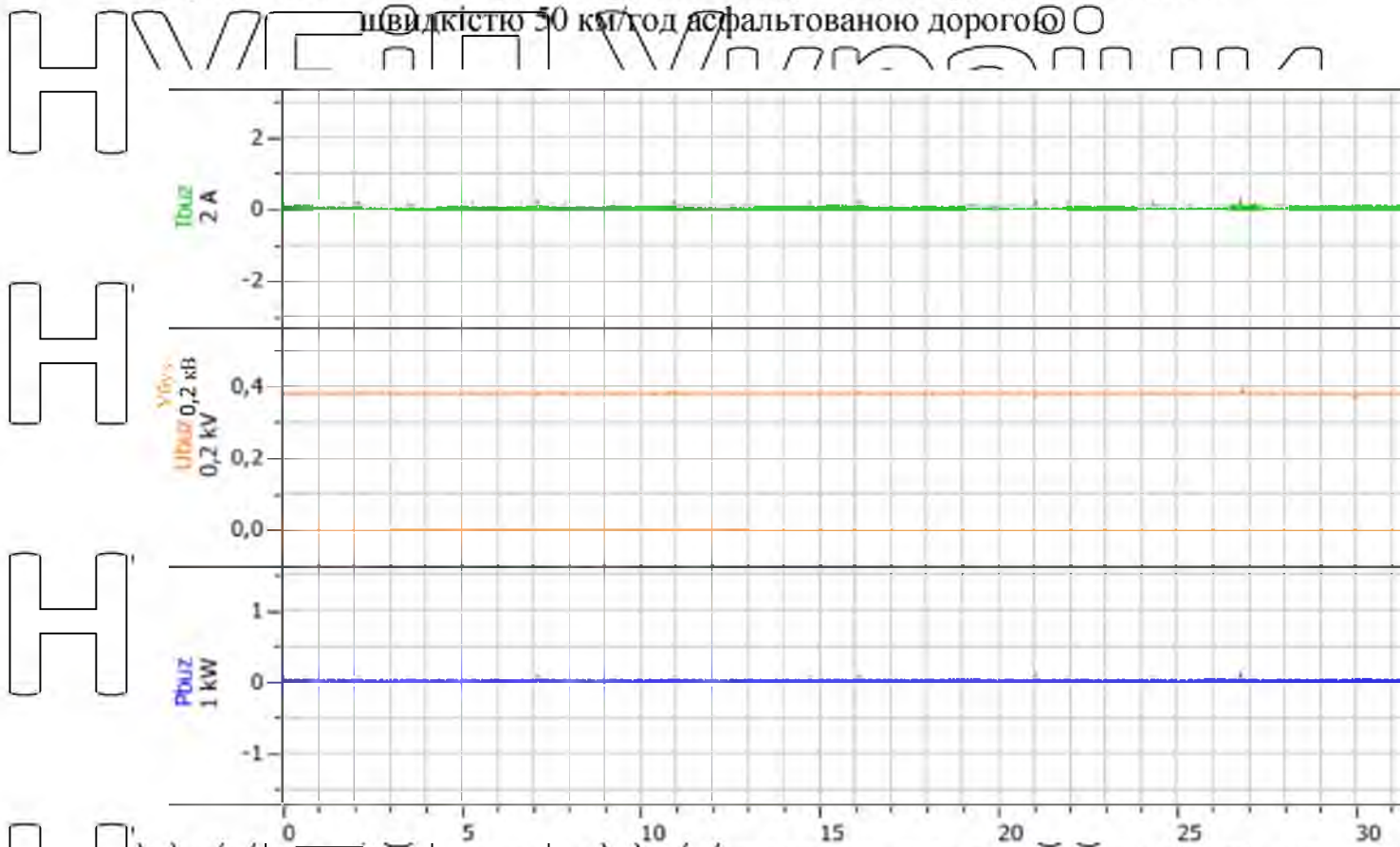
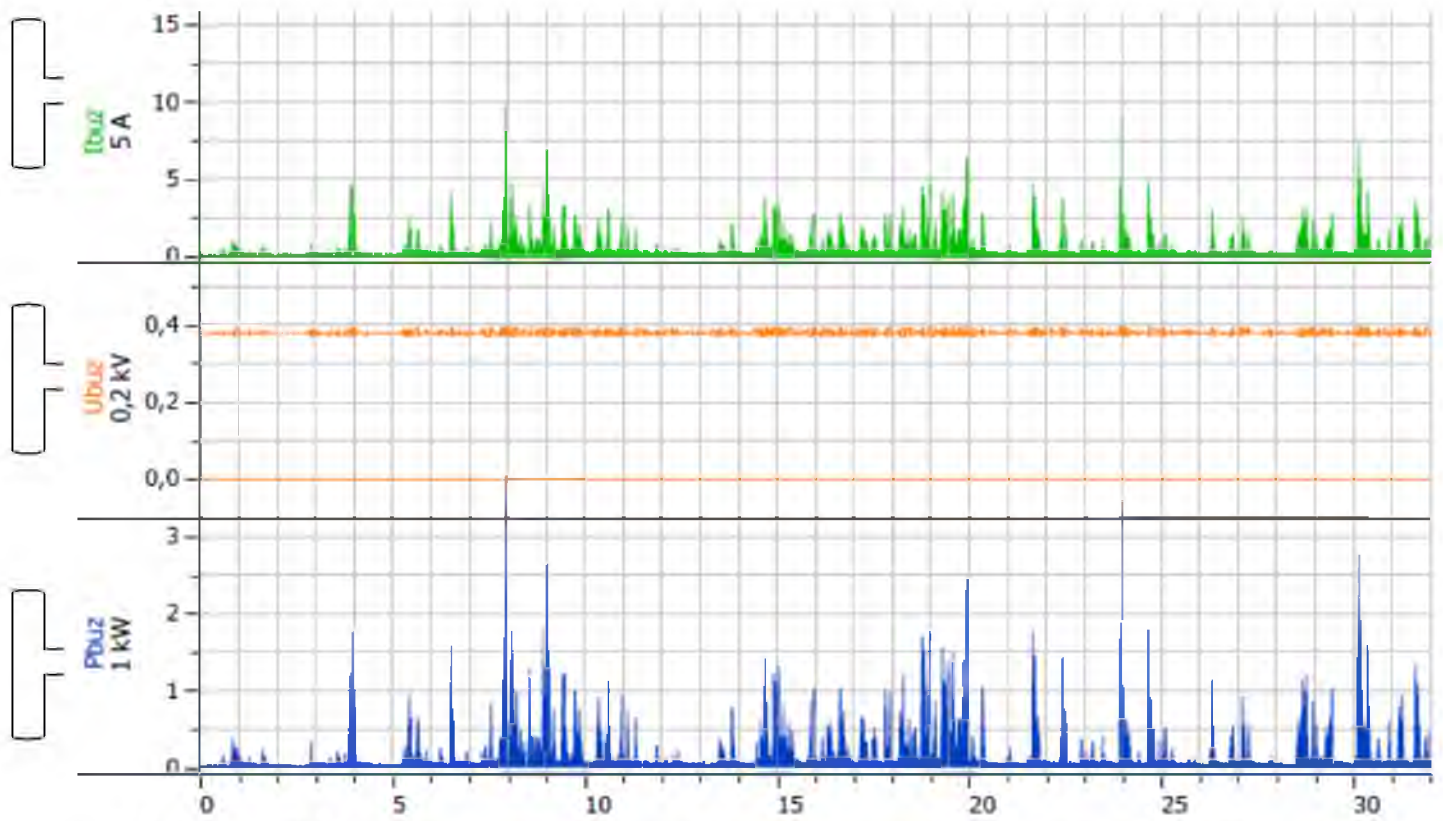
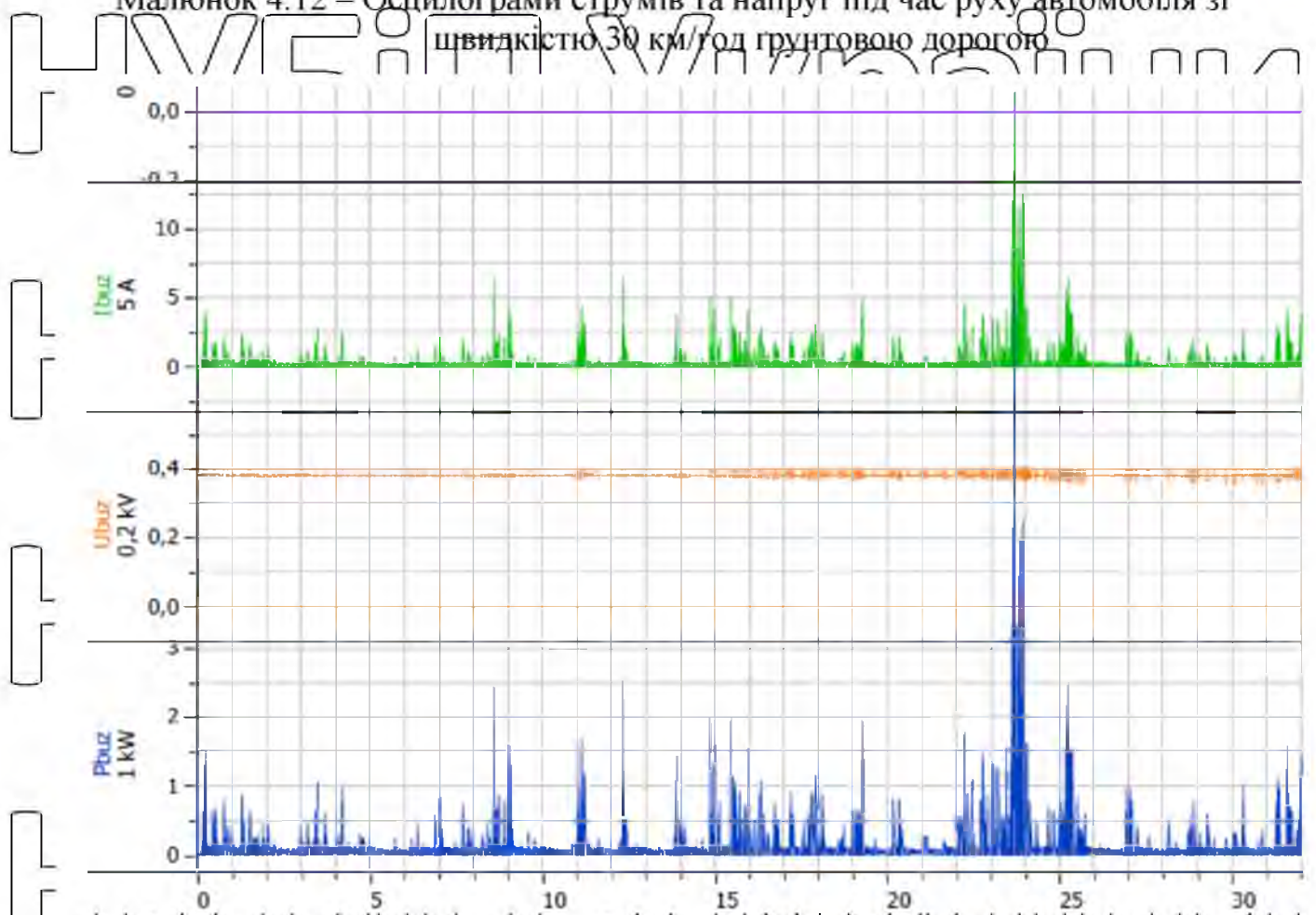


Рисунок 4.11 – Осцилограми струмів та напруг під час руху автомобіля зі швидкістю 70 км/год асфальтованою дорогою



Малюнок 4.12 – Осцилограми струмів та напруг під час руху автомобіля зі швидкістю 30 км/год ґрунтовою дорогою



Малюнок 4.13 – Осцилограми струмів і напруг під час руху автомобіля зі швидкістю 45 км/год ґрунтовою дорогою

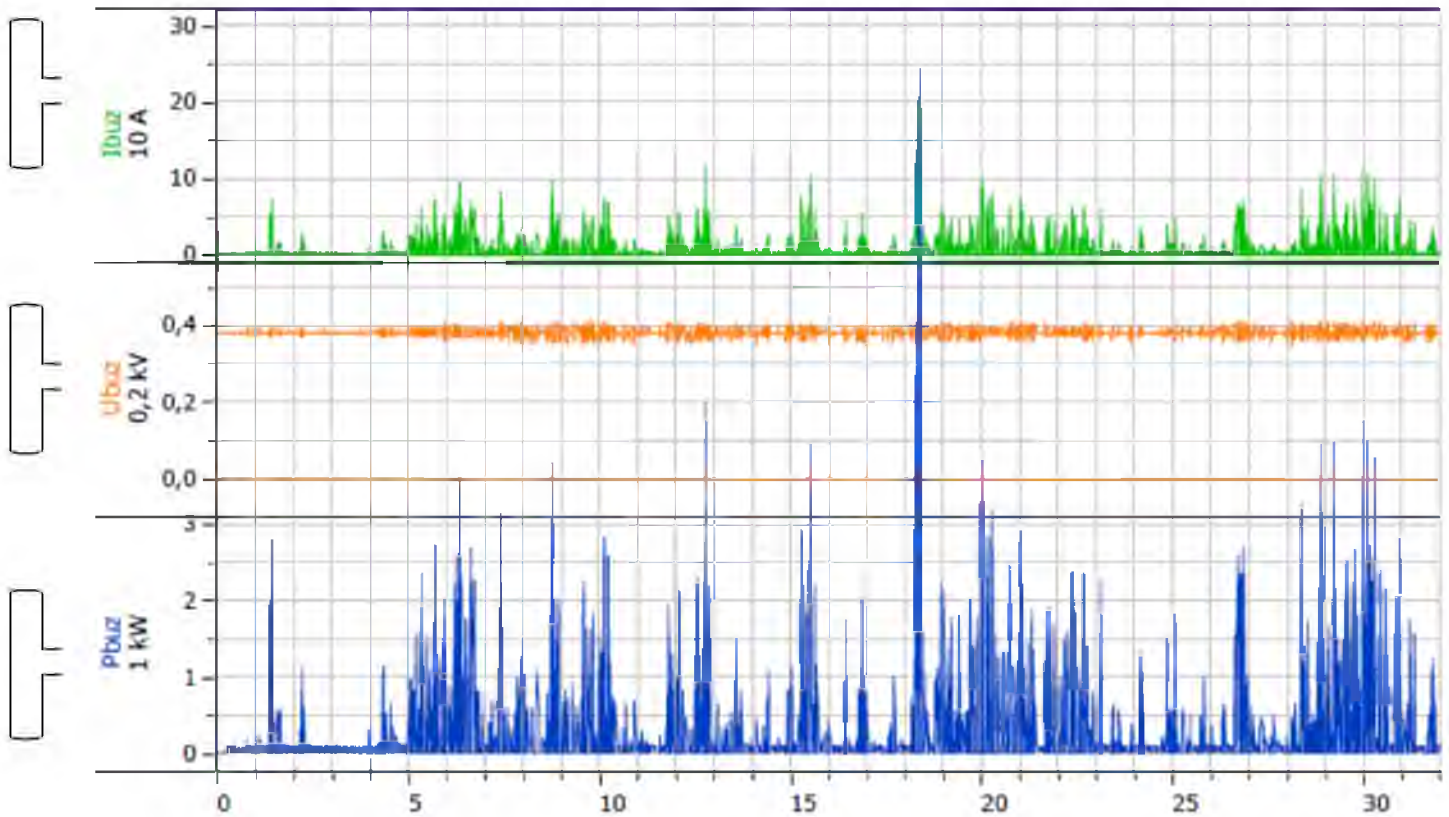


Рисунок 4.14 – Осцилограми струмів і напруг під час руху автомобіля зі швидкістю 60 км/год грунтовою дорогою

У таблиці 4.3 представлена матриця обробки результатів вимірювань. Максимальне значення фактора, що впливає, позначається знаком +, мінімальне значення - знаком --. Результати обробки вимірювань середньої відновленої потужності позначені як  $U_1$ .

Таблиця 4.3 - Матриця обробки результатів експерименту

№ експ.	фактор	Взаємодіяти.	Результати, Вт			Середнє Значення
	$v$	$\gamma_{ОДИ}$ $\gamma_{Автом}$ и $\gamma_{саміж}$	$v_{нсп}$	$U_1$	$U_3$	Д.жс Витра и замі жс
1	+	+	314	315	302	310
2	+	-	18	17	16	17
3	-	+	90	108	105	100
4	-	-	+	3	3	3

Рівняння регресії в кодованих змінних має вигляд (58):

$y = 107,83 + 55,83x_1 + 97,83x_2 + 48,83x_1x_2$  (58)

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

На основі рівняння регресії можна зробити висновок, що якість дороги найбільше впливає на вартість рекуперованої енергії. У міру збільшення швидкості руху і погіршення середньої висоти нерівностей або погіршення дорожніх умов кількість потужності, що рекуперується, збільшується.

Залежність спеціально вироблюваної енергії від умов руху представлена у вигляді рівняння регресії у натуральних змінних і має вигляд (59):

$$N_{avg} = 0,056h_{avg}v - 0,179v - 0,56h_{avg} - 2,165 \quad (59)$$

На малюнку 4.15 показано залежність вироблюваної потужності від швидкості руху та висоти нерівностей.

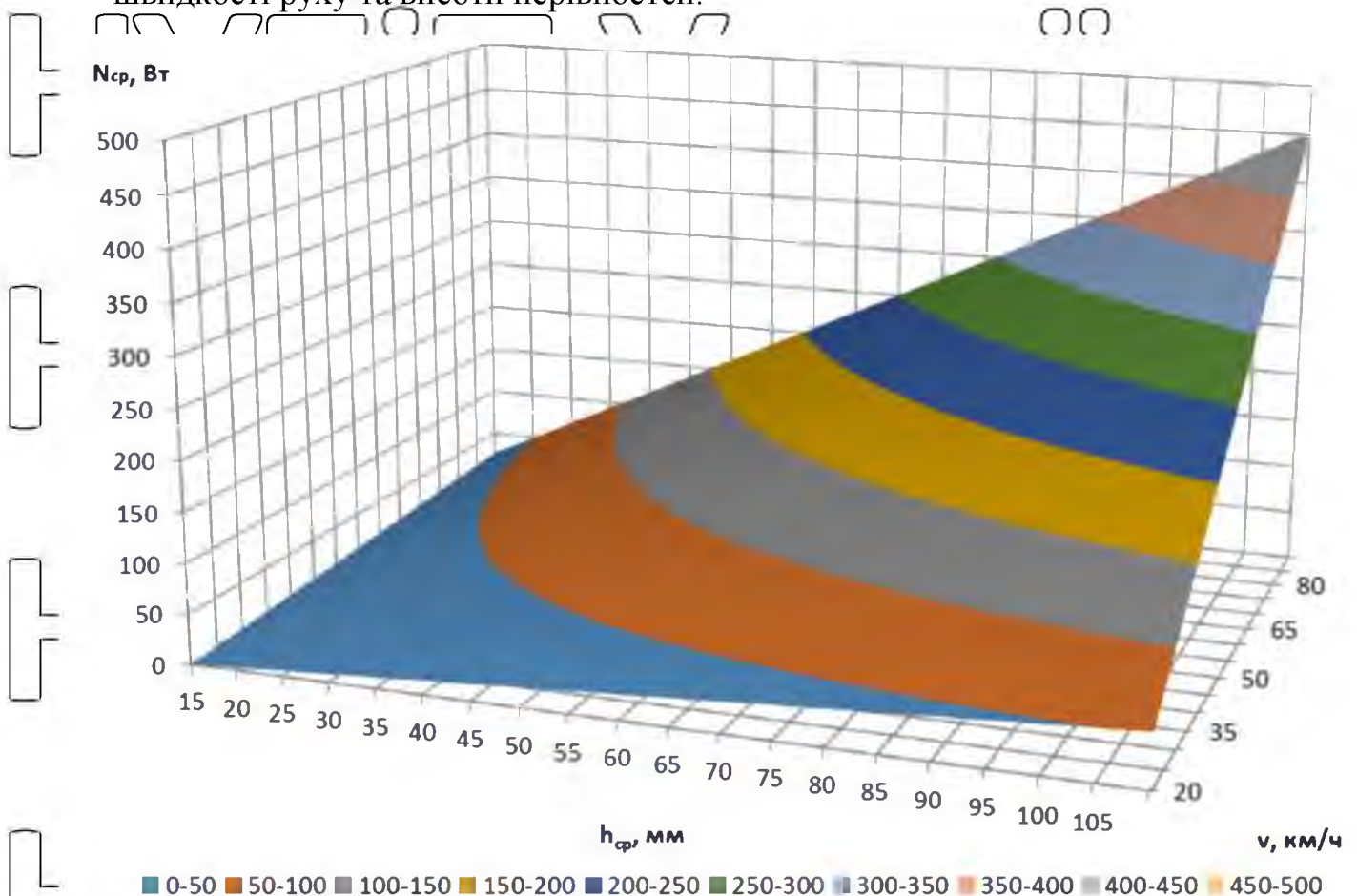


Рисунок 4.15 – Залежність ефективної потужності, що виробляється від швидкості руху і висоти нерівності

Результати визначення середньої та максимальної пікової потужності на основі математичної обробки зареєстрованих даних у ході дослідницьких випробувань представлені у таблиці 4.4. Значення максимальної пікової потужності відповідають максимальному миттєвому значенню потужності, що відновлюється під час гонки; Середнє значення продуктивності визначається як середнє арифметичне всіх розрахованих значень за тестовий запуск. Значення потужності записувалися на



виході шини.

Таблиця 4.4 – Пікові та середні показники рекуперованої електричної потужності комплекту амортизаторів

Ім'я параметра	Значення
Асфальтобетонна дорога	
Нпik, v = 30 км/год, кВт	0,048
Нав, v = 30 км/год, кВт	0,003
Нпik, v = 50 км/год, кВт	0,373
Нав, v = 50 км/год, кВт	0,013
Нпik, v = 70 км/год, кВт	0,907
Нав, v = 70 км/год, кВт	0,017
брудна дорога	
Нпik, v = 30 км/год, кВт	4240
Нав, v = 30 км/год, кВт	0,100
Нпik, v = 45 км/год, кВт	8500
Нав, v = 45 км/год, кВт	0,210
Нпik, v = 60 км/год, кВт	10 100
Нав, v = 60 км/год, кВт	0,310

Дослідницькі випробування, проведені з ARE у складі автомобіля, продемонстрували функціональність системи. Спостерігався рекуперативний ефект та накопичення енергії у накопичувачі.

Процес рекуперації енергії в накопичувачі, створюваному комплектом ARE при русі ґрунтовими дорогами, супроводжується зарядними струмами більшої величини 7,5 - 10 А і більшої щільності, що супроводжуються стрибками зарядного струму, що перевищують максимальне середнє значення значення у 2 рази до 30 А (рис. 4.12 – 4.17). Процес зарядки при русі асфальтобетонною дорогою характеризується малими струмами (менше 0,5 А) і малою щільністю. Можливі перенапруги до 1А.

#### Розділ 4. Висновки

У цьому розділі представлена оцінка результатів дослідницьких випробувань одиночних ARE та EDDC у складі транспортного засобу, методика проведення яких описана у розділі 3.

На підставі проведених досліджень умов експлуатації амортизатора надано рекомендації щодо розробки ARE, спрямовані на забезпечення його роботи більшу частину часу при переміщеннях не більше 1 мм та швидкостях

не більше 0,2 PC. Стендові випробування продемонстрували працездатність АРЕ, а також виконання розробленої конструкції вимог технічного завдання.

Результати випробувань показують, що величина потужності, що рекуперується, набагато більше залежить від якості дорожнього покриття,

ніж від швидкості електромобіля. Так, збільшення швидкості в 2 рази призводить до збільшення потужності, що відновлюється, в 2 рази, а перехід

з асфальту на ґрунтову дорогу, по якій зазвичай пересуваються трактори і сільськогосподарські машини, при тій же швидкості дозволяє на порядок

збільшити збільшення відновлюваної потужності в 30 разів.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

1. Наявні в даний час розробки систем вібрації рекуперації енергії на основі амортизаторів з регенеративним ефектом використовують електричний генератор для накопичення енергії для подальшого використання.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

Щоб знизити втрати енергії під час перетворення, рекомендується використовувати амортизатор, який використовує електромеханічний принцип перетворення.

2. У зв'язку з високими вимогами до питомої потужності, що генерується, і питомої сили для використання в конструкції амортизатора з регенеративним ефектом необхідно використовувати синхронні електрогенератори з збудженням постійними магнітами з питомими значеннями потужності 1,5-2 кВт/кг, 6,8 – 7,2 кВт/кг та питоме зусилля 4,8 – 5,2 Нм/кг, 18,2 – 22,2 Нм/л.

3. Для комплексних досліджень амортизаторів з регенеративним ефектом розроблено методику, що складається зі стендових випробувань при різних швидкостях та величинах ходу, а також натурних випробувань на автомобілі на різних дорогах при фіксованих швидкостях.

4. За результатами досліджень умов роботи демпфуючих елементів сільськогосподарських машин та сільськогосподарських тракторів у 87-99% випадків амортизатор працює при швидкостях штока до 0,2 м/с та переміщеннях до 1 мм.

5. Для посилення регенеративного ефекту необхідно збільшити швидкість зміни магнітного потоку в електричній машині за допомогою електрогенератора, що обертається, і проміжного редуктора.

6. Розроблено імітаційну модель, що дозволяє досліджувати електричні та енергетичні процеси в амортизаторах з регенеративним ефектом, у перетворювачах потужності та зарядних пристроях у системі рекуперації енергії під час руху у різних умовах.

7. В амортизаторі з лінійним електрогенератором при найбільш ймовірних швидкостях руху штока до 0,2 м/с через недостатню швидкість зміни магнітного потоку і вплив активного опору обмоток статора максимальна потужність, що виробляється не перевищує 30 Вт, що свідчить про відсутність регенеративного ефекту, а демпфування не перевищує 400 Н, що відповідає вимогам.

8. Швидкість руху та завантаження автомобіля однаково впливають на

енергію, що виробляється амортизаторами. Коли швидкість подвоюється, енергія, що виробляється, подвоюється. Те саме співвідношення можна застосувати і до маси транспортного засобу. Енергія, що виробляється амортизатором, прямо пропорційна квадрат активного діаметра електричної машини. При збільшенні діаметра вдвічі потужність збільшується в 3,8-4 рази

9. Нерівності дороги мають найбільший вплив на кількість енергії, що виробляється. Коли умови руху змінюються з асфальтованої дороги на ґрунтову з тією ж швидкістю, енергія збільшується у 30 разів.

10. Запропоновано конструкцію амортизатора з регенеративним ефектом, що ґрунтується на принципі досягнення регенеративного ефекту амортизаторів, що полягає у перетворенні частини енергії механічних коливань на електричну енергію, яку з користю використовують у сільськогосподарських машинах та сільському господарстві. Трактори при збереженні демпфуючих характеристик на основі синхронної електричної машини, що обертається, ШВП, що забезпечує збільшення швидкості зміни магнітного потоку в зазорі, гвинта з лівим і правим різьбленням і односторонніх муфт для забезпечення односпрямованого обертання. .

11. Експериментальні дослідження та імітаційні моделі показують, що зниження питомої витрати енергії або палива на рух становить до 4,23-4,7% для сільськогосподарських машин та тракторів або до 1,5-2 л/100 км палива для транспортних машин. сільськогосподарської продукції та до 3,5 літрів для сільськогосподарських тракторів порівняно зі стандартним виробництвом палива.

12. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію процесів, що відбуваються в електричних машинах та перетворювачах системи рекуперації, створення алгоритмів управління, що забезпечують як

максимальну енергоефективність, так і необхідну плавність ходу, а також вивчення та підвищення надійності та довговічності компонентів рекуперації.

система. Особливу увагу слід приділити роботі накопичувачів та споживачів енергії, оскільки вони працюють під впливом пульсуючих струмів, що генеруються амортизаторами. Дослідно-конструкторські роботи також мають

бути спрямовані на підвищення технологічності та зниження вартості компонентів системи.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

## СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

AB – акумуляторна батарея;

ARE – амортизатори із регенеративним ефектом,

AC – асинхронний електродвигун;

УЗИ – блок визначення напрямку руху та швидкості; БНН -  
встановлення підвищення напруги;

BC – блок визначення швидкості руху штанги; БУЗ –  
блок керування завантаженням;

BE - блок розрахунку енергоспоживання на рух

транспортного засобу; VI – вентиляційно-індукторна  
машина;

BM - випрямний міст;

BEM - електрична машина, що обертається; ДПТ

– двигун постійного струму;

DE – демпфуючий елемент;

IM – імітаційна модель;

ЛЕМ – лінійна електрична машина; HE

– накопичувач енергії;

IM – постійні магніти;

ПЧ – напівпровідниковий перетворювач енергії;

ПСУА – перетворювач системи керування амортизаторами;

ТС – транспортний засіб;

ЕРС – електрорушійна сила; ШВП

- ШВП;

SC – емнісний накопичувач (суперконденсатор);

СПД – синхронний електродвигун із постійними магнітами;

СРЕДП - Система рекуперації енергії деформацій підвіски; ТЕД –

тяговий електродвигун;

ТЕП – електротяговий привід; УЕ –  
пружний елемент;

ФП – перетворювач функцій;

ШІМ - широтно-імпульсна модуляція;

SOC — це рівень заряду акумулятора.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України