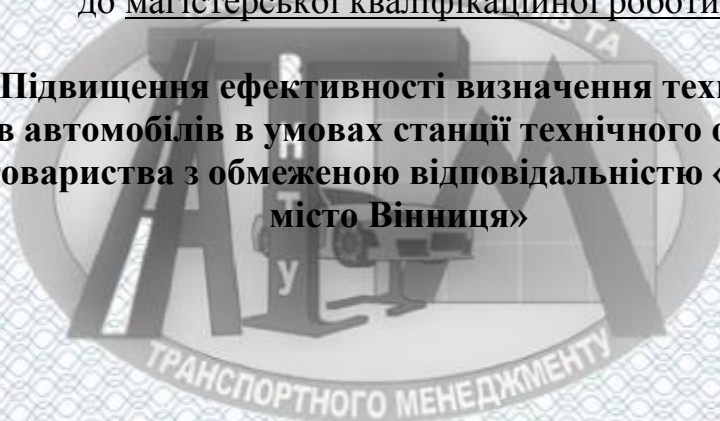


Вінницький національний технічний університет  
Факультет машинобудування та транспорту  
Кафедра автомобілів та транспортного менеджменту

**Пояснювальна записка**  
до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему **«Підвищення ефективності визначення технічного стану генераторів автомобілів в умовах станції технічного обслуговування автомобілів товариства з обмеженою відповідальністю «Джерман-Центр» місто Вінниця»**



Виконав: студент 2 курсу,  
групи 1АТ-18мз спеціальності 274 –  
Автомобільний транспорт  
**Драговенко В.В.**

Керівник: канд. екон. наук, ст. викл.  
Огневий В.О.

Рецензент: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Вінниця – 2020 року

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
РОЗДІЛ 1 НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБОК З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГЕНЕРАТОРІВ АВТОМОБІЛІВ В УМОВАХ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ ТОВАРИСТВА З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ДЖЕРМАН-ЦЕНТР».....	11
1.1 Технічна діагностика електрогенератора .....	11
1.2 Обґрунтування вибору фізичного принципу діагностування.....	17
1.2.1 Методи діагностування підшипникових вузлів.....	17
1.2.2 Області застосування різних методів і вирішені ними завдання.....	18
1.3 Аналіз діагностичного параметра.....	21
1.4 Аналіз маркетингового середовища станції технічного обслуговування автомобілів товариства з обмеженою відповідальністю «Джерман-Центр».....	26
1.4.1 Загальна характеристика підприємства.....	26
1.4.2 Аналіз діяльності підприємства.....	28
1.4.3 Дослідження ринку послуг СТО.....	30
1.5 Аналіз стану існуючої виробничо-технічної бази.....	33
1.5.1 Огляд існуючої структури виробничо-технічної бази.....	33
1.5.2 Аналіз і оцінка стану виробничо-технічної бази і ступеня використання виробничої потужності.....	34
1.6 Аналіз існуючої системи і організації ТО і ПР.....	39
1.7 Висновки до розділу 1 .....	43
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ підшипникового вузла Електрогенератора.....	45
2.1 Розробка узагальненої діагностичної моделі підшипника кочення на рівні геометричного і силового уявлення.....	45
2.2 Математична модель трибоспряжень деталей підшипника кочення з урахуванням параметрів фактичного контактування, макро і мікрогеометрії...52	52
2.3 Моделювання електричного опору трибоспряжень.....	56

2.4	Визначення опору опори тертя.....	61
2.4.1	Визначення опору контакту при граничному терті.....	62
2.4.2	Визначення опору контакту при напіврідинному терті.....	63
2.4.3	Визначення опору контакту при рідинному терті.....	65
2.5	Теоретичний розрахунок моделей сигналів.....	66
2.5.1	Визначення умов чисельного експерименту.....	66
2.5.2	Моделювання сигналу опору.....	67
2.5.3	Дослідження впливу шорсткості контактуючих поверхонь на фактичну площу контакту.....	67
2.6	Спосіб отримання діагностичного параметра НІЧ.....	69
2.7	Висновки до розділу 2.....	70
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ генераторів автомобілів .....		71
3.1	Експериментальне дослідження працездатності принципу діагностування.....	72
3.1.1	Експериментальні дослідження працездатності принципу діагностування для двоопорного підшипникового вузла .....	72
3.2	Метод діагностування.....	76
3.2.1	Суть методу.....	76
3.2.2	Методика діагностування.....	77
3.2.2.1	Алгоритм процедури вимірювання електричного опору.....	77
3.2.2.2	Алгоритм обробки отриманих експериментальних даних.....	79
3.2.2.3	Розробка алгоритму визначення дефектного підшипника в вузлі тертя.....	80
3.3	Розробка засобів діагностування.....	81
3.3.1	Розробка пристрою вимірювання електричного опору.....	82
3.3.1.1	Огляд аналогів.....	82
3.3.1.2	Розробка структурної схеми.....	85
3.3.1.3	Розробка функціональної схеми.....	87
3.3.1.4	Аналіз фазового фільтра.....	88

3.3.1.5 Аналіз смугового фільтра.....	89
3.3.1.6 Аналіз елементів фазового фільтра.....	93
3.3.1.7 Аналіз значень елементів перемножувача.....	95
3.3.1.8 Сумарна похибка.....	96
3.3.2 Експериментальні дослідження працездатності методу вимірювання електричного опору.....	97
3.3.3 Дослідження працездатності методу визначення дефектного підшипника.....	101
3.4 Метрологічне забезпечення методу.....	102
3.5 Параметри проведення діагностування.....	105
3.6 Висновки до розділу 3.....	106
<b>4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....</b>	<b>107</b>
4.1 Аналіз умов праці.....	107
4.2 Організаційно-технічні рішення щодо забезпечення безпечної роботи.....	107
4.2.1 Санітарні вимоги до приміщень.....	107
4.2.2 Мікроклімат.....	108
4.2.3 Вентиляція.....	108
4.2.4 Освітлення.....	108
4.2.5 Шум.....	109
4.2.6 Вібрації.....	110
4.3 Пожежна безпека.....	111
4.3.1 Визначення категорії приміщення.....	112
4.4 Техніка безпеки.....	113
4.4.1 Електробезпека.....	113
4.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	114
4.5.1 Дія іонізуючих випромінювань на людей.....	114
<b>РОЗДІЛ 5. ОРГАНІЗАЦІЙНО-економічне обґрунтування розробленої методики діагностування.....</b>	<b>116</b>

5.1 Технологія діагностування.....	116
5.2 Розрахунок економічного ефекту.....	117
5.3 Визначення етапу впровадження методу діагностування.....	120
5.4 Висновки до розділу 5.....	124
ВИСНОВКИ.....	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	127



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Одним із завдань розвитку автотранспортних засобів є підвищення експлуатаційної надійності. Для її вирішення необхідний випуск більш надійних вузлів і деталей, вдосконалення методів експлуатації, до чого відноситься підвищення ефективності діагностування автомобілів.

Надійність автотранспортного засобу визначається складовими його конструкції вузлами і деталями, вихід з ладу генератора потягне за собою неможливість подальшої експлуатації транспорту і може призвести до виходу з ладу акумулятора, бортової електроніки і т. д.

У зв'язку з цим виникає необхідність підвищення якості контролю технічного стану автомобільних генераторів.

Однією з причин виходу з ладу генератора є відмова підшипникового вузла. На автотранспортних підприємствах, авторемонтних заводах, фірмах і майстернях, станціях технічного обслуговування, а також на заводах по виготовленню генераторів є кошти, призначені для контролю електричних характеристик, в той час як для діагностування підшипникового вузла використовується органолептичний метод, який не має нормованих метрологічних характеристик і дозволяє виявити обмежену кількість дефектів.

Визначивши режим тертя, можливо оцінити ресурс підшипників у вузлі. Таким чином, розробка методу і засобів діагностування підшипникового вузла дозволить підвищити надійність автотранспортних засобів.

Найбільш перспективним є електрорезистивний метод діагностування, але даний метод має недолік: в зоні тертя генерується ЕРС (термо- і трибо-ЕРС), яка володіє невідомими амплітудою і частотою, тим самим вносить невизначеність в результат вимірювання і ускладнює процес визначення технічного стану об'єкта, тому зниження впливу ЕРС на результат вимірювання дозволяє підвищити ефективність діагностування.

Особливою складністю є діагностування двохопорового підшипникового вузла, тому що в даний час поверхнево опрацьовано питання про виділення

діагностичної інформації про конкретний підшипник у вузлі. Пропонується підхід, заснований на тому, що електричний опір підшипника з гіршим технічним станом буде меншим, а так як підшипники в вузлі з'єднані електрично паралельно і загальний опір буде набувати менших значень, то для визначення дефектного підшипника досить визначити, який має менший опір.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконувалась у відповідності з напрямками наукових досліджень кафедри автомобілів та транспортного менеджменту.

**Мета і завдання дослідження** - підвищення ефективності експлуатації автотранспортних засобів за рахунок вдосконалення методики діагностування генератора шляхом впровадження оцінки режиму тертя в підшипниковому вузлі, виявлення дефектного підшипника трибоелектричним методом на тлі дії ЕРС в зонах тертя.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішуються наступні завдання:

- аналіз проблеми діагностування підшипникового вузла генератора автомобіля, вибір методу діагностування, діагностичного параметра;
- розробка математичної моделі діагностичного сигналу електричного опору підшипникового вузла генератора автомобіля з урахуванням впливу зовнішніх і внутрішніх факторів;
- розробка методу і засобів діагностування підшипникового вузла генератора автомобіля;
- розробка практичних рекомендацій щодо впровадження методу і засобів діагностування в умовах автосервісного підприємства.
- розробка заходів щодо забезпечення необхідного рівня охорони праці та безпеки у надзвичайних ситуаціях при виконанні наукових досліджень.

**Об'єкт дослідження** - процес діагностування підшипникового вузла генератора автомобіля шляхом аналізу його сигналу електричного опору.

**Предмет дослідження** - закономірності, що характеризують процес діагностування підшипникового вузла генератора автомобіля шляхом аналізу його сигналу електричного опору.

### **Методи дослідження.**

Проведені теоретичні дослідження засновані на положеннях теорій: електропровідності контакту двох шорсткуватих тіл, пружності, контактної гідродинаміки, контакту реальних поверхонь. Для проведення досліджень використовувалися методи математичного аналізу, аналітичні та чисельні методи вирішення систем рівнянь, методи спектрального.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- математична модель діагностичного сигналу електричного опору підшипникового вузла генератора автомобіля для різних типорозмірів підшипників, умов роботи, що відрізняється можливістю моделювання двохопрного вузла, урахуванням впливу оксидних і адгезійних шарів на робочих поверхнях підшипників кочення;
- теоретичне обґрунтування залежностей електричного опору двохопрного підшипникового вузла автомобільного генератора від умов роботи, типорозміру підшипників, шорсткості їх контактуючих поверхонь;
- метод діагностування підшипникового вузла генератора, що дозволяє визначити технічний стан підшипників, що входять до його складу, яка відрізняється можливістю визначення дефектного підшипника в вузлі, зменшення впливу ЕРС в зоні тертя підшипників на результат діагностування.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Розроблена методика діагностування, яка дозволяє проводити оцінку технічного стану двохопрного підшипникового вузла генератора автомобіля.

**Достовірність теоретичних положень** магістерської кваліфікаційної роботи підтверджується коректним застосуванням математичних методів та збіжністю результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень.

**Апробація результатів роботи.** Проміжні результати досліджень були опубліковані серед матеріалів XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, 2020 р.

**Публікації.** Матеріали магістерської роботи висвітлені у 1 опублікованій науковій праці, з яких 1 – опублікована праця апробаційного характеру.



# **РОЗДІЛ 1 НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗРОБОК З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГЕНЕРАТОРІВ АВТОМОБІЛІВ В УМОВАХ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВТОМОБІЛІВ ТОВАРИСТВА З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ДЖЕРМАН-ЦЕНТР»**

## **1.1 Технічна діагностика електрогенератора**

Для оцінки актуальності проблеми діагностування підшипникового вузла електрогенератора проведемо аналіз поточної ситуації. Регламент технічного обслуговування для різних марок автомобілів залежить від виробника і розрізняється по періоду проведення робіт, їх змістом.

Технічний стан електрогенератора визначається в ході щоденного технічного обслуговування (ЩО), першого технічного обслуговування (ТО-1), другого технічного обслуговування (ТО-2), сезонного обслуговування (СО).

В ході ЩО перевіряється працездатність генератора за показниками бортових приладів, в ході ТО-1 перевіряється кріплення генератора і стан його контактних з'єднань, при ТО-2 проводиться огляд і очищення зовнішньої поверхні від пилу і бруду, перевірка кріплень генераторної установки, перевірка кріплення шківів генератора. При СО знімається генератор для очищення і продувки внутрішньої поверхні, при необхідності розбирається, замінюються зношені деталі і проводиться мащення підшипників.

Потреба у використанні стендового обладнання, як правило, виникає при необхідності визначення причини відхилення електричних характеристик генератора від заданих. Прикладом використовуваного стендового обладнання є стенд Е-240, Е-250-2, К484 [4].

Для легкових автомобілів, на прикладі Volkswagen Passat, перевірка працездатності генератора здійснюється після 15 тис. км, 30 тис. км, 45 тис. км, 60 тис. км, 75 тис. км, 90 тис. км, 105 тис. км, а так само в ході ЩО, за

показаннями бортових приладів. Можливі причини та методи усунення несправностей представлені в таблиці 1.1 [26].

Таблиця 1.1 – Діагностика електрогенератора автомобіля Volkswagen Passat

Причина несправності	Метод усунення
Горить сигналізатор відсутності заряду акумуляторної батареї. Напруга бортової мережі автомобіля нижче 13,8 В (перевіряється тестером)	
Ослаб натяг ременя приводу генератора	Замінити ремінь
Несправний регулятор напруги	Замінити регулятор
Пошкоджені діоди випрямляючого блоку	Замінити випрямляючий блок
Порушено з'єднання виводів обмотки збудження з контактними кільцями, замикання чи обрив в обмотці	Замінити ротор генератора або генератор в зборі
Обрив або коротке замикання в обмотці статора, замикання її на «масу» (при замиканні генератор виле)	Перевірте омметром обмотку. Замініть статор або генератор в зборі
Напруга бортової мережі автомобіля вище 14,5 В (перевіряється тестером)	
Пошкоджений регулятор напруги	Замініть регулятор
Шум генератора	
Пошкоджені підшипники генератора (шум). Шум залишається при відключенні проводів від генератора і зникає при знятті ременя приводу	Замініть задній підшипник, передній підшипник з кришкою або генератор в зборі
Коротке замикання в обмотці статора (шум). Шум зникає, якщо від'єднати провідники від генератора	Замініть статор або генератор в зборі
Коротке замикання в одному з діодів. Шум зникає, якщо від'єднати провідники від генератора	Замініть випрямляючий блок

Незважаючи на те, що в генераторах використовуються закриті підшипники, вони не є повністю герметичними, а умови роботи відрізняються підвищеним рівнем забруднення, внаслідок чого, всередину можуть потрапляти частинки пилу, що впливають на процес мащення. В наслідок подолання водних перешкод всередину може потрапляти волога, утворюючи водні суспензії. Близьке розташування генератора до двигуна призводить до коливань температури, при яких працює мастило, внаслідок чого змінюються його фізичні характеристики, зменшується ресурс підшипника. [4]

Розглянемо причини виходу з ладу генераторної установки. Для легкових автомобілів: відмова регулятора напруги (29%), відмова випрямного блоку (21%), знос деталей кріплення (2%), замикання обмоток ротора і статора на корпус (5%), порушення контактів в місці пайки висновків обмотки ротора до контактних кілець (8%), міжвиткове замикання обмоток ротора і статора (11%), поганий контакт між щітками і контактними кільцями (10%), обрив обмоток ротора і статора (7%), знос підшипників (7%).

У підшипникових вузлах електрогенераторів обраного типу використовуються однорядні радіальні кулькові підшипники. Аналіз причин виходу з ладу самих підшипників на основі даних статистичних джерел [17], представлений в таблиці 1.2, показав, що основною причиною виходу з ладу підшипників є проблеми з мастильним матеріалом.

Таблиця 1.2 - Причини виходу з ладу підшипників кочення

I		II		III	
Причина	відсоток, %	Причина	відсоток, %	Причина	відсоток, %
Бруд	45,4	Старе мастило	20	Недостатній рівень мастила	36
Неправильне збирання	12,8	Невідповідне мастило	20	Втома металу	34
Перекося	12,6	Тверді забруднення	20	погана підгонка деталей	16
Недостатній рівень мастила	11,4	Недостатній рівень мастила	15	Забруднення	14
Перевантаження	8,1	Неправильний вибір підшипника	10		
Корозія	3,7	Рідкі забруднення	5		
Неправильна обробка цапфи	3,2	Неправильний монтаж	5		
		Відносна втрата	5		
Інше	2,8	Дефекти матеріалів і виробництва	<1		

Як видно з таблиці 1.2 основною причиною відмови підшипників є неякісний стан мастильного матеріалу, параметри якого впливають на режим тертя, в якому працює підшипник кочення. Кращим є рідинне тертя, при якому

знос контактуючих поверхонь мінімальний, неможливість підшипника працювати в цьому режимі буде говорити про його несправність, таким чином, контролюючи режим тертя можна судити про його технічний стан, а на підставі методики розрахунку модифікованого ресурсу підшипників можна отримати прогноз щодо терміну їх експлуатації.

При цьому, для діагностування підшипникового вузла відсутні інструментальні методи, замість яких використовується органолептичний метод. Для оцінки технічного стану перевіряється наявність додаткових акустичних складових в спектрі шуму і плавність ходу вала генератора [26]. При незадовільному результаті проводиться заміна підшипників, після складання генератора оцінка якості збірки так само проводиться органолептичним методом. У результаті неякісного складання поширеними дефектами є перекося в установці підшипників і неправильне мащення підшипників, що скорочує термін служби генератора. Недоліком органолептичного методу є високі вимоги до фахівця, що підвищує вартість діагностування, а недостатня кваліфікація призводить до похибок в результаті діагностування. Оцінимо необхідність проведення діагностики підшипників генератора, обчисливши розрахунковий ресурс підшипників електрогенератора, через те, що передній підшипник сприймає більші навантаження, ніж задній, то використовуємо підшипник типу 6302RS ГОСТ 8338-75. Номінальний розрахунковий ресурс по ГОСТ 18555-2013:

$$L_{10} = (C_r / P_r)^3, \quad (1.1)$$

де  $C_r$  – базова динамічна радіальна розрахункова вантажопідємність, Н  
 $P_r$  – еквівалентне динамічне радіальне навантаження, Н.

$$C_r = b_m \cdot f_c (\cdot i \cdot \cos(\alpha))^{0.7} \cdot Z^{2/3} \cdot D_w^{1.8}, \quad (1.2)$$

де  $b_m$  – коефіцієнт, характеризуючий властивості сталі з врахуванням способу її виготовлення;

$f_c$  – коефіцієнт, залежний від геометрії деталей підшипника, точності їх виготовлення і матеріалу;

$i$  – число рядів шариків або роликів;

$\alpha$  – номінальний кут контакту підшипника;

$Z$  – число шариків або роликів в однорядному підшипнику;

$D_w$  – діаметр шарика.

Тоді розрахункова вантажопідйомність складе  $C_r = 2529$  Н.

Еквівалентне динамічне навантаження для радіального навантаження:

$$P_r = X \cdot F_r, \quad (1.3)$$

де  $F_r$  – радіальне навантаження,

$X$  – коефіцієнт динамічного радіального навантаження,  $X=1$ .

Підшипниковий вузол електрогенератора є двохопорним, тому радіальне навантаження розподіляється по підшипниках [24]:

$$F_{r1} = F_H \cdot (l_n + l_p) / l_n, \quad (1.4)$$

$$F_{r2} = F_H \cdot l_n / l_p, \quad (1.5)$$

де  $F_H$  – радіальне навантаження, Н;

$l_n$  – відстань від першого підшипника, до точки прикладення радіального навантаження, м;

$l_p$  – відстань між підшипниками, м.

Для першого і другого підшипників по формулі 1.4, 1.5 з врахуванням сили натягу ремня в 100 Н і відстанями  $l_n=0,03$  м,  $l_p=0,095$  м:

$$F_{r1} = 100 \cdot (0,03 + 0,095) / 0,095 = 131,579, \text{ Н};$$

$$F_{r2} = 100 \cdot 0,03 / 0,095 = 31,579, \text{ Н}.$$

Вибиремо значення  $F_r = F_{r1}$  виходячи з того, що підшипник під найбільшим навантаженням буде підлягати більшому зносу, тоді  $P_r = F_r = F_{r1} = 131,579 \text{ Н}$ , тоді номінальний розрахунковий ресурс по ГОСТ 18555-2013:

$$L_{10} = \left( \frac{2529}{145,8} \right)^3 = 5219, \text{ млн. об.}$$

Вводячи поправочний коефіцієнт:

$$L = L_{10} \cdot a_1,$$

(1.6)

де  $a_1$  – коефіцієнт модифікації ресурсу по ймовірності безвідмовної роботи, для  $P=0,9$ ,  $a_1=1$ , для  $P=0,95$ ,  $a_1=0,64$ .

Тоді ресурс, з врахуванням ймовірності безвідмовної роботи:

$$L_{0,9} = 5219 \cdot 1 = 5219, \text{ млн. об}$$

$$L_{0,95} = 5219 \cdot 0,64 = 3340, \text{ млн. об.}$$

Число обертів, які здійснить вал генератора:  $n$

$$n = M \cdot 60 \cdot N,$$

(1.7)

де  $M$  – ресурс генератора, год,

$N$  – частота обертання вала генератора, об-1.

Ресурс підшипників буде вичерпаний при роботі на 12000 обертах за час 10000 годин, що буде відповідати 500 мотогодин роботи на даних обертах. Дані розрахунки показують, що ресурс підшипника може бути вичерпаний при допустимих режимах роботи генератора, що говорить про доцільність проведення діагностики генератора.

Розробка інструментальних засобів діагностування та методики, яка регламентує процедуру діагностування, дозволить підвищити ефективність діагностування електрогенератора, що підвищить його експлуатаційну надійність.

## 1.2 Обґрунтування вибору фізичного принципу діагностування

Для розробки методу і засобу діагностування опори кочення потрібно вибрати фізичний принцип діагностування, для цього необхідно провести аналіз фізичних процесів і явищ в зоні тертя підшипника кочення, що є складовою частиною опори кочення. Проведемо аналіз патентної літератури з метою виявлення найбільш універсального методу, який дозволить би охопити для діагностики найбільше число факторів.

### 1.2.1 Методи діагностування підшипникових вузлів

В даний час існує досить велика кількість опублікованих оглядових робіт і монографій, в яких висвітлюється питання систематизації методів оцінки стану підшипникових вузлів і їх елементів, зокрема, мастильних матеріалів. Для вибору напрямку подальшої роботи, вибору принципу дії методу для діагностування потрібно провести аналіз вже існуючих. За фізичним принципом дії виділимо таку класифікацію методів діагностування:

- 1) методи спектрометрії, фотометрії;
- 2) механічні методи;
- 3) теплові методи;

- 4) електричні методи;
- 5) віброакустичні методи (вібродіагностичні, шумодіагностичні, акустичної емісії, ультразвукові методи).

### 1.2.2 Области застосування різних методів і вирішені ними завдання

Методи спектрометрії, фотометрії набули широкого поширення серед методів аналізу мастильних матеріалів. Основна область використання - оцінка параметрів мастильних матеріалів, визначення хімічного складу і наявності домішок. Використовують методи аналізу ступеня поглинання світлового потоку, аналізу спектру оптичного або лазерного випромінювання. Останній метод призначений для вирішення завдань: визначення параметрів домішок металів в мастильному матеріалі; контролю якості параметрів мастильного матеріалу; оцінки технічного стану, ступеня зносу машин і механізмів за параметрами домішок, виявлених в мастильному матеріалі; оцінки здатності мастильних матеріалів зберігати свої властивості при різних температурах; визначення температурного матеріалу мастил; визначення обсягу продуктів зносу в використаному мастилі двигунів; оцінки впливу мастил на процес корозії.

Механічні методи діагностування є найбільш поширеними. Для окремих видів трибоспрямижень вони входять в число стандартних методів визначення технічного стану. До даного класу методів відноситься широкий комплекс методів, призначених для вимірювання сил і моментів тертя, визначення масогабаритних параметрів деталей вузлів і продуктів зносу.

Щодо аналізу мастильних матеріалів механічні методи вирішують завдання: оцінку енергії активації термомеханічної деструкції мастильних матеріалів при терті; оцінку ступеня забруднення мастильного матеріалу домішками механічного походження.

Теплові методи застосовуються в промисловості і на підприємствах сервісу та ремонту, так як дозволяють виміряти карту розподілу теплових полів



в вузлі, деталі. Слід зазначити, що часто теплові методи поєднують з методами які мають іншу природу, наприклад, спільно з оптичними, ультразвуковими або механічними. Використання теплових методів вирішує завдання: оцінку здатності мастильних матеріалів зберігати свої властивості при різних температурах; визначення температурних властивостей мастил; оцінку ступеня забрудненості; визначення окисних властивостей.

Віброакустичні методи в даний час інтенсивно розвиваються і є найбільш поширеними в сфері сервісу і ремонту автотранспорту. Їх перевагою є можливість діагностування великої кількості видів дефектів виготовлення і збірки трибовузлів, причому в умовах функціональної діагностики.

Інтенсивний розвиток віброакустичних методів спричинив появу кількох їх різновидів: вібродіагностичні, шумодіагностичні, акустичної емісії, ультразвукові.

Вібродіагностичні методи трибологічних досліджень використовують для вирішення наступних завдань: прогнозування технічного стану підшипників кочення; контролю і діагностування технічного стану підшипників і редукторів.

Шумодіагностичні методи використовують для вирішення ряду завдань. Методи суб'єктивної оцінки шуму зводяться до елементарного пошуку несправностей. Наприклад, досвідчений контролер здатний по шуму і легкості обертання виявити підшипники з дефектами на тілах і доріжках кочення, виявити неякісно зібрані підшипники, оцінити радіальне і осьове биття в них.

Зазвичай методи цієї групи використовують для оцінки якості трибоспряджень на етапі його виготовлення або при технічному обслуговуванні та ремонті механізмів машин. Незважаючи на деякі переваги, методи суб'єктивної оцінки можна вважати лише оцінними, здатними виявити тільки грубі дефекти трибоспряджень [8].

Методи акустичної емісії використовують для вирішення завдань: контролю і діагностування технічного стану підшипників і редукторів; оцінки якості конструкцій і процесів їх руйнування; прогнозування технічного стану підшипників кочення [4].

Ультразвукові методи використовуються менш інтенсивно, але при цьому, їх використання в сукупності з тепловими та механічними методами використовуються для вирішення завдань: оцінки забрудненості мастила механічними домішками; випробування колісних пар вагонів; контролю і діагностування підшипників кочення [16].

Електричні методи використовуються для оцінки технічного стану трибоспрязень. В їх основі лежить оцінка стану об'єкта по електричним діагностичним параметрам. Електричні методи призначені для вирішення наступних завдань: оцінки зносу контактуючих поверхонь по об'єму продуктів зносу в мастильному матеріалі; вимірювання електричного опору або електричної провідності мастильного матеріалу; оцінки забруднення мастил домішками; визначення параметрів багатокомпонентних матеріалів [24].

Електричні методи здійснюються з використанням діагностичних параметрів: електрична ємність мастильного матеріалу; ЕРС електромагнітної індукції індукційного перетворювача; питома електрична провідність мастильного матеріалу; електричний опір трибосистеми [1] в якій генерується різниця потенціалів між електродами, зануреними в мастильний матеріал, який відпрацював заданий час; індикація факту електричного контакту деталі трибоспрязень і вимірювального електрода [9]; напруженість електричного поля, необхідного для електричного пробою окисної плівки твёрдосплавного ріжучого інструменту; сила струму якоря двигуна, який приводить в обертання вал підшипникового вузла; нормований інтегральний час (НІЧ) електричного мікроконтактування. Реалізація методів фотометрії і спектрофотометрії вимагає відбору мастильного матеріалу, що буває неможливим або утрудненим через конструктивні особливості вузлів; в основному ці методи спрямовані на вирішення завдання визначення зносу, що звужує сферу їх застосування.

Механічні методи складні в реалізації через вимоги до інерційності обладнання, малочутливі до дефектів на початковій стадії їх розвитку.

Теплові методи характеризує велика інерційність процесів, залежність результатів діагностування від умов тепловіддачі, слабкий взаємозв'язок між надлишковою температурою в зоні тертя і дефектами підшипника.

Ефективність віброакустичних методів обмежена складністю виділення необхідної інформації. Вібраційний і акустичний методи засновані на аналізі спектру інформаційного сигналу і до основних недоліків цих методів можна віднести: труднощі розшифровки спектрограми через близьке розташування спектральних складових і їх можливого перекриття внаслідок коливань частоти обертання ротора електрогенератора, необхідність врахування сигналів від інших джерел, труднощі при розшифровці спектра при наявності декількох дефектів і значний вплив зовнішніх впливів на підшипники, вимоги до високої кваліфікації персоналу.

Електричні методи контролю, що використовують для отримання інформаційного сигналу первинні перетворювачі, засновані на перетворенні електричного опору трибоспряжень в вузлі тертя в сигнал напруги або струму, має наступний недолік: в зоні тертя генерується ЕРС, яка володіє невідомими амплітудою і частотою і тим самим вносить невизначеність в результат вимірювання і ускладнює винесення судження про технічний стан об'єкта.

### 1.3 Аналіз діагностичного параметра

Під час роботи підшипників контактуючі поверхні розділені мастильною плівкою, яка зменшує знос деталей, розрізняють наступні режими: рідинний, напіврідинний, граничний. В умовах рідинного тертя товщина плівки достатня для поділу поверхонь і знос мінімальний, при граничному режимі поверхні контактують між собою, при напіврідинному присутній гідродинамічний і рідинний режим тертя. Для оцінки режиму тертя використовується параметр мастильної плівки  $\lambda$ .

Знос деталей впливає на ресурс підшипникового вузла, для його оцінки використовуються різні методики, засновані на різних умовах: за критерієм

обсягу мастильного матеріалу в підшипнику [11], за критерієм навантаження і впливу на циклічну довговічність зовнішніх і внутрішніх факторів [20]. Однак скористаємося регламентованою методикою по ГОСТ 18555-2013 за оцінкою номінального і модифікованого ресурсу на основі вантажопідйомності, навантаження, ймовірності безвідмовної роботи, умови мастила, ступеню забруднення. В якості діагностичного параметра був запропонований параметр НІЧ, його функціональна зв'язок з параметром мастильної плівки  $\lambda$  визначається виразом [24]:

$$\bar{K} = \left\{ 1 - [0,5 + \Phi(\lambda)]^{9,27 g F_r^{2/3} \cdot 10^{-9}} \right\}^2, \quad (1.8)$$

де  $\Phi$  – функція Лапласа, для  $\lambda=1$ ,  $\Phi=0,3413$ , для  $\lambda=3$ ,  $\Phi=0,4987$ , для  $\lambda=3,1$ ,  $\Phi=0,499$ ;

$q$  – приведена густина нерівностей робочих поверхонь деталей підшипника,  $q=108 \text{ м}^{-2}$ ;

$F_r$  – радіальне навантаження,  $F_r=131,6 \text{ Н}$ .

Границям режимів роботи буде відповідати:

$$\bar{K}(0) = 1;$$

$$\bar{K}(1) = 0,969;$$

$$\bar{K}(3) = 1,016 \cdot 10^{-3}.$$

Знаючи, вимірне значення параметра НІЧ можна знайти параметр  $\lambda$ . Так як інтеграл функції Лапласа не береться, то обчислення проводяться ітеративно, шляхом поступового наближення, до отримання заданої точності.

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{ISO} \cdot L_{10}, \quad (1.9)$$

де  $a_1$  – коефіцієнт модифікації ресурсу по ймовірності безвідмовної роботи, для  $P_{0,95}=0,64$ ;

$a_{ISO}$  – системний коефіцієнт модифікації ресурсу;

$L_{10}$  – номінальний розрахунковий ресурс.

Проведемо аналіз залежності модифікованого ресурсу підшипника від діагностичного параметра НІЧ.

При малих навантаженнях, нижче порогового значення, нормальних умовах роботи ресурс може бути нескінченним. Однак реальний підшипник працює в умовах, що призводять до його виходу з ладу, причиною може бути фізичне пошкодження доріжок кочення, недостатня товщина мастильної плівки, підвищена температура, порушення допусків і посадок при складанні підшипникового вузла.

Ефективність мастильного режиму оцінюється можливістю поділу контактуючих поверхонь. Системний коефіцієнт модифікації ресурсу ГОСТ 18555-2013:

$$(1.10) \quad \begin{cases} a_{ISO} = 0,1 \left[ 1 - \left( 2,5671 - \frac{2,2649}{k^{0,054361}} \right)^{0,83} \left( \frac{e_c C_U}{P} \right)^{1/3} \right]^{-9,3}, & \text{для } 0,1 \leq k < 0,4; \\ a_{ISO} = 0,1 \left[ 1 - \left( 2,5671 - \frac{1,9987}{k^{0,19087}} \right)^{0,83} \left( \frac{e_c C_U}{P} \right)^{1/3} \right]^{-9,3}, & \text{для } 0,4 \leq k < 1; \\ a_{ISO} = 0,1 \left[ 1 - \left( 2,5671 - \frac{1,9987}{k^{0,071739}} \right)^{0,83} \left( \frac{e_c C_U}{P} \right)^{1/3} \right]^{-9,3}, & \text{для } 1 \leq k < 4; \end{cases}$$

де  $k$  – відносна вязкість,

$e_c$  – коефіцієнт забруднення,

$C_U$  – межа втомного навантаження, Н,

$P$  – динамічне еквівалентне навантаження, Н.

Розглянемо вплив на передній підшипник, як схильний до найбільшого навантаження, для нього  $P_r = 131,6$  Н.

Спрощена оцінка втомного навантаження:

$$C_U = C_O / 22, \quad (1.11)$$

де  $C_0$  – статична вантажопідйомність,  $C_0=5,3$  кН,

Якщо розрахунковий параметр мастильної плівки  $\lambda$ , то

$$k \approx \lambda^{1,3}.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} e_c = \alpha(1 - 0,6796 / D_{pw}^{1/3}), \delta e \alpha = 0,0864 k^{0,68} D_{pw}^{0,55} \text{ при } \alpha \leq 1, \\ \text{високаступіньчистоти,} \\ e_c = \alpha(1 - 1,141 / D_{pw}^{1/3}), \delta e \alpha = 0,0432 k^{0,68} D_{pw}^{0,55} \text{ при } \alpha \leq 1, \\ \text{нормальна чистота,} \\ e_c = \alpha(1 - 1,887 / D_{pw}^{1/3}), \delta e \alpha = 0,0177 k^{0,68} D_{pw}^{0,55} \text{ при } \alpha \leq 1, \\ \text{слабкезвичайнезабруднення,} \\ e_c = \alpha(1 - 2,2668 / D_{pw}^{1/3}), \delta e \alpha = 0,0115 k^{0,68} D_{pw}^{0,55} \text{ при } \alpha \leq 1, \\ \text{високазабрудненість,} \\ e_c = \alpha(1 - 4,06 / D_{pw}^{1/3}), \delta e \alpha = 0,00617 k^{0,68} D_{pw}^{0,55} \text{ при } \alpha \leq 1, \\ \text{дуже сильнезабруднення,} \end{array} \right. \quad (1.12)$$

де  $D_{pw}$  – діаметр центрального кола шариків,  $D_{pw}=28,5$  мм.

Рівень забруднення вибирається виходячи з умов експлуатації, в даному випадку відповідає умовам слабкої звичайного забруднення: чистий вузол, помірна герметизація щодо робочого середовища, повторне мащення згідно з технічними умовами виробника.

Залежність модифікованого ресурсу від діагностичного параметра представлена на рисунку 1.1.

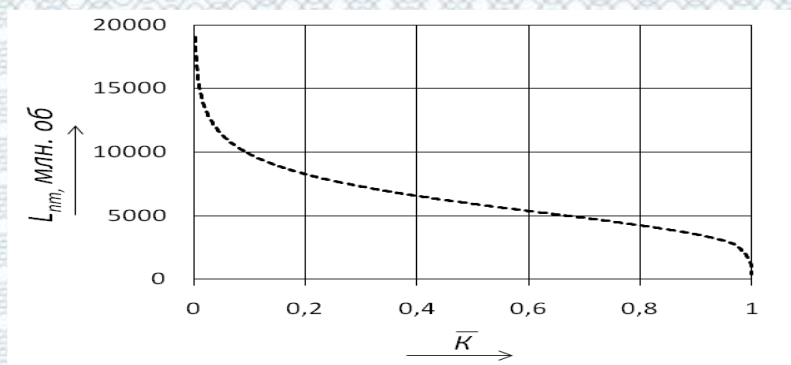


Рисунок 1.1 - Залежність модифікованого ресурсу від параметра ПІЧ

Для генератора Г288Е частота обертання ротора при напрузі 28В становить без навантаження 1180 об-1, при навантаженні не більше 30 А - 1900 об-1, максимальна частота обертання 8000 об-1. З врахуванням цих даних, були отримані залежності моторесурсу від діагностичного параметра НІЧ.

$$L_m = \frac{L_{nm}}{60 \cdot N}, \quad (1.13)$$

де  $N$  – частота обертання вала генератора.

Для електрогенератора Г-228Е коефіцієнт передачі від вала двигуна становить  $k_g = \frac{1}{2,04}$  [23]; для міських умов характерна четверта передача, з коефіцієнтом передачі рівним  $k_{kn} = 1$ , який при середній швидкості 60 км/год і коефіцієнті передачі редуктора вала  $k_{pe} = 4,44$  відповідає числу обертів  $N_d = 2500$  об<sup>-1</sup> вала двигуна [23]. Таким чином, одному оберту підшипника генератора буде відповідати наступне число обертів колеса  $N_k$ :

$$n = \frac{N_k \cdot k_{pe}}{k_{kn}} \cdot \frac{1}{k_g}. \quad (1.14)$$

Одному оберту колеса буде відповідати наступний пройдений шлях:

$$L_k = N_k \cdot \pi \cdot D_k, \quad (1.15)$$

де  $D_k$  – зовнішній діаметр шини,  $D_k = 575,2$  мм.

Звідси знайдем відстань яку пройде автомобіль, що відповідає розрахунковому значенню ресурсу підшипника:

$$L_k = L_{10} \cdot \frac{k_{kn}}{k_{pe}} \cdot \frac{k_{\epsilon}}{1} \cdot \pi \cdot D_k \cdot \quad (1.16)$$

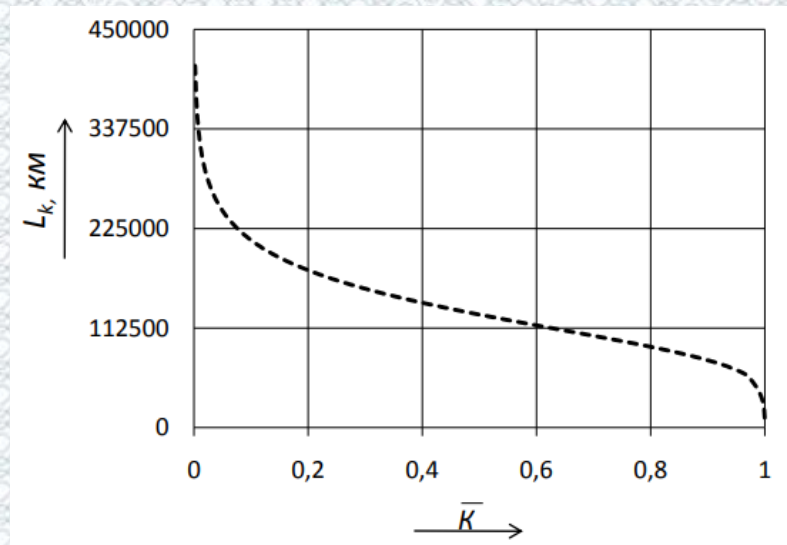


Рисунок 1.2 – Залежність ресурсу генератора, від параметра НІЧ

#### 1.4 Аналіз маркетингового середовища станції технічного обслуговування автомобілів товариства з обмеженою відповідальністю «Джерман-Центр»

##### 1.4.1 Загальна характеристика підприємства

Найменування підприємства: товариство з обмеженою відповідальністю «Джерман-Центр».

Місце знаходження підприємства: м. Вінниця, вул Лебединського, 19.

Товариство здійснює свою діяльність та реалізує права відповідно до Конституції України, Цивільного кодексу України, Господарського кодексу України та інших нормативно-правових актів.

Товариство з обмеженою відповідальністю «Джерман-Центр» (надалі ТОВ) є офіційним дилером компанії- виробника автомобілів Volkswagen AG.

Територія ринкової відповідальності - м. Вінниця та Вінницька область.

Предмет діяльності ТОВ – просування на ринок автомобілів бренду Volkswagen, передпродажна підготовка і продаж автомобілів, гарантійне і



післягарантійне обслуговування, поточний ремонт, а також продаж оригінальних запасних частин і аксесуарів.

Мета діяльності – надання автосервісних послуг власникам автомобілів Volkswagen в Вінниці і Вінницькій області з метою одержання прибутку.

Підприємство реалізує ринкову і технічну політику компанії- виробника автомобілів Volkswagen, використовує її технології, сертифіковане виробником обладнання та програмне забезпечення.

Як і всі провідні компанії- виробники автомобілів , Volkswagen AG висуває до своїх дилерів стандартизовані вимоги (так звані дилерські стандарти) відносно технології продажів і сервісу, технічного оснащення, продажів запасних частин, архітектури, дизайну.

В дилерських стандартах чітко позначаються головні функціональні зони, які визначають структуру інтер'єру:

- автосалон і зони обслуговування клієнтів;
- СТО і склад запасних частин;
- адміністрація, зони побутового призначення і службові приміщення.

Зона автосалону повинна знаходитись на передньому плані в дилерському центрі. Центральна вісь між головним входом і рецепцією – основа дилерського центру. Вона визначає загальну картину розташування автомобілів: легкових, позашляховиків, мінівенів.

Презентаційна зона побудована за принципом площі ринку, на якій автомобілі розташовуються по колу передньою частиною до центру. Це забезпечує ефект меж і в той же час місце для реклами та створює атмосферу іміджу.

Зона видачі нового автомобіля клієнту відокремлена від автосалону. Вона організована так, щоб створити святкову і урочисту атмосферу.

Рецепція СТО забезпечує прямий контакт с з ділянкою приймання і огляду автомобілів і цеха СТО через стіни з прозорого скла.

ТОВ «Джерман-Центр» в м. Вінниці відповідає всім вимогам і регламентованим стандартам, які висуваються до дилерських підприємств

#### 1.4.2 Аналіз діяльності підприємства

Основні види діяльності підприємства згідно «Класифікатора видів економічної діяльності (КВЕД-2015)»: оптова та роздрібна торгівля автотранспортними засобами; технічне обслуговування та ремонт автотранспортних засобів; торгівля деталями та приладдям для автотранспортних засобів.

Основні клієнти СТО ТОВ – приватні і корпоративні власники автомобілів марки Volkswagen різних типів, моделей і комплектацій.

Для своїх клієнтів ТОВ виконує наступний перелік послуг:

- передпродажна підготовка;
- гарантійне обслуговування;
- гарантійний ремонт;
- обслуговування автомобілів протягом післягарантійного періоду;
- прибирально-мийні роботи;
- комп'ютерна діагностика;
- поточний ремонт;
- ремонт двигунів;
- діагностика і ремонт ходової частини;
- розвал-сходження коліс;
- перевірка геометрії кузова;
- шумоізоляція і віброізоляція салону автомобіля;
- тонування скла, розтонування;
- ремонт електрообладнання;
- ремонт інжекторних систем;
- заміна всіх видів технічних рідин;
- рихтувальні роботи;
- фарбувальні роботи;
- лакофарбовий ремонт;
- полірування кузовів автомобілів;

- експрес сервіс;
- заправка і ремонт кондиціонерів;
- підбір запасних частин;

В таблиці 1.3 наведені основні показники виробничо – фінансової діяльності СТО автомобілів «Джерман-Центр».

Таблиця 1.3 – Основні показники виробничо-фінансової діяльності СТО

Показники	Одиниці виміру	2018р.	2019р.	Темп росту, %
1. Обсяг реалізації послуг:	тис. грн.	2764	2769	100,2
в т.ч.: послуги	тис. грн.	2005	1838	91,6
запчастини	тис. грн.	630	682	108,4
інші	тис. грн.	159	160	100,8
2. Вартість нормо-години	грн.	175	195	112,5
3. Товарообіг всього	тис. грн.	742	763	102,89
в т.ч. роздрібний товарообіг	тис. грн.	405	413	102,15
з нього: запчастин	тис. грн.	339	353	104,36
комісійний	тис. грн.	12,7	11,4	90
інший	тис. грн.	0,7	0,3	50
4. Балансовий прибуток	тис. грн.	105,7	105,2	99,54
в т.ч.: від основного виробництва	тис. грн.	63,2	61,8	97,74
від торгівлі	тис. грн.	36,7	38,3	104,64
інший (оренда і т.п.)	тис. грн.	6,8	6,1	88

В обсяг реалізації всіх послуг, включена вартість побутових послуг по ремонту і ТО легкових автомобілів, виконаних на замовлення споживачів, тобто без вартості використаних при ремонті запасних частин і основних матеріалів, за які замовник розраховується окремо.

В роздрібний товарообіг включається вартість проданих запасних частин, автомобільних приладів, обладнання та матеріалів.

При виконанні на СТО одноразових замовлень сторонніх організацій, що розраховуються по безготівковому рахунку, обсяги виконаних робіт не включаються в загальний обсяг реалізації послуг.

Відомості, наведені в таблиці 1.3, дають змогу зробити висновок про те, що на протязі останнього року має місце незначне погіршення деяких показників роботи ТОВ «Джерман-Центр».

Тобто, необхідне проведення ряду організаційно-технічних заходів, направлених на підвищення ефективності роботи СТО, покращення обслуговування, розширення спектру послуг, які надаються.

Одним з важливих показників діяльності СТО є кількість автомобілезаїздів.

Статистика автомобілезаїздів в рік на СТО, визначена за обліковими даними підприємства за останній період часу, наведена в таблиці 1.4 За період приймається календарний рік (2017 – 2019 рр.).

Таблиця 1.4 – Показники роботи СТО

Роки	Автомобіле-заїзди на СТО «Джерман-Центр» в рік
2017	2040
2018	2080
2019	2077

Отже можна зробити висновок, що кількість автомобіле-заїздів в рік на СТО зросла з 2017 року лише на 1,78%. Це пояснюється тим, що власники звертаються на СТО частіше, але з метою виконання більш дрібних ремонтних робіт, а складніші роботи виконуються на СТО за меншою ціною послуг.

В свою чергу на ринку нових автомобілів спостерігається стабільність продажів марки Volkswagen, через достатню відомість Volkswagen, довіру до цієї марки, що спричиняє необхідність проходження ТО на сертифікованій станції для збереження гарантії.

#### 1.4.3 Дослідження ринку послуг СТО

Як правило, для збереження гарантії підтримки автомобіля в роботодатному стані власники автомобілів Volkswagen, як нових так і з певним пробігом, зобов'язані на протязі певних проміжків пробігу проходити технічне обслуговування на СТО «Джерман-Центр». Багато з тих хто проходить ТО на станції технічного обслуговування в гарантійний період, приїздить виконувати

ремонт та обслуговування і після закінчення гарантії на автомобіль. Адже тут можна замовити оригінальні запчастини для автомобілів Volkswagen, мастильні матеріали, виконати додаткові роботи.

З метою надання сучасного сервісу, на СТО обладнано зручне місце для відпочинку клієнтів, встановлені автомати з кавою та іншими напоями. На вулиці обладнана зона відпочинку для клієнтів.

Сторонні СТО не можуть конкурувати з фірмовою СТО по автомобілях марки Volkswagen «Джерман-Центр» тому, що при майже однаковому рівні цін, а в деяких випадках і вище, тут роботи виконуються якісно на сучасному спеціалізованому обладнанні, яке застосовується саме на обслуговування автомобілів марки Volkswagen.

Не значну конкуренцію даному СТО складають малі майстерні в яких ціни на обслуговування і ремонт нижчі, ніж на даній СТО, проте вони не мають такого високого рівня професіоналізму, як тут, більшість обладнання на них застаріла і використовується з порушенням всіх норм експлуатації.

В порівнянні з конкурентами СТО «Джерман-Центр» має такі переваги: потужну матеріально – технічну базу, наявність висококваліфікованих працівників, якісний сервіс, наявність комфортних приміщень для клієнтів, ізольованих від запаху бензину, газу та інших шкідливих випарів.

Ціни на СТО не найнижчі в місті. Це пояснюється спеціалізованістю СТО на автомобілях марки Volkswagen, тим що застосовується дороге обладнання закордонного виробництва і з необхідністю сплати податків.

Потужних конкурентів, спеціалізованих саме на обслуговуванні автомобілів Volkswagen, станція не має. Основними конкурентами є СТО, які обслуговують різні марки автомобілів.

Як відомо, основою для наявності конкурентних переваг є передове технологічне оснащення СТО, висококваліфікований персонал, організація роботи з застосуванням спеціалізації, яка знижує собівартість послуг та підвищує продуктивність праці.

Отже проведемо сегментацію за місцем надання послуг СТО автомобілів в м. Вінниці з технічного обслуговування та ремонту легкових автомобілів. За ознаку сегментації ринку приймаємо класифікацію послуг, яка наводиться нижче.

Визначивши потенційну ємність ринку та дослідивши її розподіл між конкурентами, зводимо дані у таблицю 1.5.

Таблиця 1.5 – Розподіл потенційної ємності на ринку між СТО та їх категорії

Позначення на рис.1.2	Назва СТО	Частка ринку,%	Категорія СТО
1	СТО «Джерман-Центр»	21	2-4
2	СТО «Вінничина Авто»	13	2-4
3	СТО «RESPECT AUTO»	22	2-4
4	СТО «Мерідіан – Авто»	10	1-2
5	СТО "Автохелп"	20	2-4
6	Дрібні приватні майстерні, гаражі	9	1
7	Вільна частина ринку	5	-

Розподіл робіт з ТО та ремонту автомобілів в залежності від часу виконання та категорії СТО наведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Розподіл робіт по ТО та ремонту автомобілів в залежності від часу їх виконання та категорії СТО

Час виконання роботи	Категорія СТО	Види робіт
Більше 8 годин	4	Поновлювальний ремонт кузова. Великі оббивно-арматурні та фарбувальні роботи. Капітальний ремонт.
4-8 годин	3	ТО-2. Дрібні та середні оббивно-арматурні, кузовні та фарбувальні роботи. Середній ремонт агрегатів автомобіля Антикорозійна обробка кузова. Інші види робіт тривалістю 4... 8 годин.
2-4 години	2	ТО-1. Поточний ремонт агрегатів та вузлів, приладів систем запалювання та живлення. Інші види робіт тривалістю 2...4 години.
До 2 годин	1	Загальне та поелементне діагностування. Змащення. Заміна мастил та експлуатаційних рідин. Регулювання кутів встановлення коліс, гальм, приладів системи запалювання та живлення. Заміна та балансування коліс Шиномонтаж. Дрібний ремонт на базі заміни вузлів. Перевірка та регулювання токсичності двигуна. Мийно-прибиральні та косметичні роботи по кузову. Інші види робіт тривалістю до 2 годин.

## 1.5 Аналіз стану існуючої виробничо-технічної бази

### 1.5.1 Огляд існуючої структури виробничо-технічної бази

СТО «Джерман-Центр» складається з ряду одноповерхових приміщень: комерційна мийка автомобілів 18×6 м, лінія технічного контролю 18×6 м, фарбувально-рихтувальний цех 18×30 м, виробничий корпус 12×30 м, адміністративний корпус 18×6 м, склади 18×9 м, торгова зала автомагазину 20×24 м, кімнати відпочинку. Будівля виконана з двотаврових металоконструкцій, обшитих рифленою жерстю, утеплена мінеральною ватою, оздоблена вікнами по периметру та вітриною. Перегородки між приміщеннями цегляні, обшиті гіпсокартоном. Дах приміщення виконано на основі двотаврових балок вкритих рифленою жерстю, з ізоляційним матеріалом (гідроізоляційна плівка) та утепленням (мінеральна вата), остаточно дах покритий спеціальною гумою. Станція займається технічним обслуговуванням та ремонтом автомобілів марки Volkswagen. Виконується ТО-1, ТО-2, поточний ремонт, капітальний ремонт агрегатів. СТО надає майже усі види послуг по ремонту автомобілів. СТО налічує у своєму складі 15 робітників. На території СТО розташована також стоянка автомобілів, зовнішня експозиційна площадка автомобілів, зовнішня експозиційна площадка автомобілів бувших у користуванні, тимчасова стоянка автомобілів клієнтів, продані автомобілі та автомобілі готові до видачі, приміщення відпочинку, майданчик для паркування співробітників. Також можливе проведення додаткових робіт на вимогу клієнта, таких як: антикорозійна обробка, тонування скла, встановлення сигналізації, магнітоли тощо.

На території СТО є стоянка автомобілів. У персоналі СТО працюють тільки кваліфіковані робітники, більшість з яких пройшло додаткове навчання на спеціальних курсах компанії для підвищення своєї кваліфікації. Усі керівні посади займають спеціалісти з великим досвідом. В магазині можливий продаж додаткового обладнання такого як автомагнітоли, автоакустика, сигналізації від

провідних виробників по найкращих цінах. Всі замовлення можна індивідуально обговорити з майстром, щоб той урахував усі побажання власника автомобіля. На СТО виконують гарантійний ремонт і заміну за необхідністю несправного компонента.

На СТО «Джерман-Центр» також є власний склад мастильних матеріалів від провідних виробників по цінам виробника. СТО «Джерман-Центр» закупляє мастила та інші рідини (гальмівна рідина, тосол та ін.) у виробника тому якість їх висока, а ціни помірні. Також є стоянка для автомобілів працівників і відвідувачів. Також на СТО є широкий вибір запасних частин до автомобілів Volkswagen. Рівень праці на СТО організований на високому рівні. СТО працює за 6-ти денним робочим тижнем.

На СТО встановлено наступне обладнання: шість 3-и тонних двостійкових піднімачів, тест-лінія МАХА, стенд вимірювання геометрії шасі Beissbarth з чотиристійковим 4-х тонним піднімачем Rotary, шиномонтаж та балансування Beissbarth, станція заправки та обслуговування кондиціонерів ВЕНР, мийка на два поста, стійка гідравлічна для обслуговування трансмісії та ходової частини, пневмоінструмент, сканери [Carman Scan VG+](#), мотортестер, стенд для правки колісних дисків LOTUS та для балансування коліс; обладнання для рихтування кузовів легкових автомобілів, набори інструментів.

1.5.2 Аналіз і оцінка стану виробничо-технічної бази і ступеня використання виробничої потужності

В табл. 1.7 наведемо основні техніко-економічні показники для типової СТО та СТО «Джерман-Центр».

Аналіз даних таблиці 1.7 свідчить, що:

- територія СТО більша нормативного значення на 33 %. Це свідчить про те, що СТО може розвивати свою виробничо-технічну базу;
- чисельність працюючих ремонтних робітників менша нормативної на 22%, що вказує на необхідність збільшення чисельності персоналу, або



підвищені продуктивності праці робітників за рахунок засобів механізації та автоматизації праці. При підвищені продуктивності праці з'явиться можливість обслуговування більшого числа автомобілів;

Таблиця 1.7 – Техніко-економічні показники для існуючої СТО «Джерман-Центр» і типової СТО

Назва показника	Показники		$\frac{П_i^ф}{П_i^н} \cdot 100 \%$
	Існуючої СТО, Пфі	Типової СТО, Пні	
1. Автомобілезайди, тис. в рік	2,1	2	105
2. Площа ділянки, га	0,8	0,6	133
3. Чисельність виробничих робітників, чол.	28	36	78
4. Корисна площа виробничих приміщень, м <sup>2</sup>	1350	900	150
5. Корисна площа адміністративно - побутових приміщень, м <sup>2</sup>	162	250	75
6. Число автомобіле-місць на постах, шт.	10	10	100

- корисна площа виробничих приміщень також більша нормативної на 50 %, що дає можливість удосконалення організації виконання робіт ТО і ремонту;
- ВТБ забезпечена постами ТО і ПР на 100 %.

СТО «Джерман-Центр» має такі значення техніко-економічних показників через те, що при її будівництві використовувалась наявна вільна земельна ділянка площею 0,8 га, тобто проектувальники і будівельники «прив'язували» СТО до місцевих умов.

Проаналізувавши стан ВТБ СТО можна зазначити, що вона придатна для виконання якісного ремонту ТО легкових автомобілів, але необхідно розширити перелік послуг, які надаються, для задоволення потреб існуючих та залучення нових клієнтів, збільшення швидкості обслуговування на якісному обладнанні.

ВТБ на СТО потребує вдосконалення, так як потужності СТО повністю не використовується, в наявності є головний корпус в якому площа не зовсім раціонально використовується, можна ще додатково встановити підйомники та модернізувати існуючі підйомники, модернізувати обладнання діагностичної і інших дільниць.

Показниками, що характеризують стаціонарну виробничу базу, є рівні фондооснащеності ВТБ, забезпеченості площами для ТО і ПР, пристосованості приміщень для ТО і ПР сучасних і перспективних моделей автомобілів, прогресивності застосованих будівельних конструкцій.

Для показників, що характеризують стан технологічного обладнання, використовують: структури виробничих фондів, устаткування; рівні фондоозброєності і механоозброєності ремонтних робітників, механізації і автоматизації виробничих процесів, експлуатаційної технологічності устаткування; коефіцієнт руху основних виробничих фондів.

Більшість автомобілів, що обслуговуються на СТО це сучасні автомобілі Volkswagen, проте обслуговуються і такі автомобілі марки Volkswagen, конструкції яких є застарілими, при модернізації ВТБ, потрібно враховувати тенденції розвитку автомобільного транспорту для того щоб можна було пристосувати СТО до широкого спектру сучасних автомобілів. Наприклад потрібно більше стендів для діагностування і ремонту, слід встановити комп'ютерний діагностичний стенд, стенд для ультразвукового очищення форсунок.

Рівень праці на СТО організований на високому рівні. СТО працює за 6 денним робочим тижнем.

Персонал на СТО кваліфікований багато працівників мають спеціалізацію для роботи з різноманітним інструментом, не тільки з тим, що працюють зазвичай, тому після вдосконалення ВТБ не потрібно буде додатково проводити перекваліфікацію працюючого персоналу.

Зазначимо, що виходячи з виробничих потреб адміністрація може встановлювати з урахуванням характеру й умов праці максимальну тривалість роботи протягом дня за підсумованим обліком робочого часу не більше 12 годин.

За наявності письмової згоди працівника допускається встановлення більшої тривалості щоденної роботи, якщо характер та умови праці передбачають періоди очікування ситуації, коли працівник повинен негайно

стати до виконання роботи, і якщо в нього є можливість відпочивати протягом зміни.

Комплексну оцінку стану ВТБ виконують за такими напрямками: характеристика виробничих приміщень, стан технологічного устаткування, характеристика рівня технології ТО і ПР, рівень організації та управління виробництвом.

У відповідності до матеріалів річної фінансової звітності у 2019 році СТО мало показники подані в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Наявні активи і пасиви СТО

Показник	Значення, тис. грн.
Будинки, споруди та передавальні пристрої	1142
Машини і обладнання	558
Інструмент, прилади, інвентар	492
Запаси (матеріали, паливо, запасні частини та інше)	122
Разом	2314

Визначимо структуру виробничих фондів, які складаються з активної і пасивної частини:

$$C_a = \Phi_{ВТБ}^a / \Phi_{ВТБ}; \quad (1.17)$$

$$C_n = \Phi_{ВТБ}^n / \Phi_{ВТБ}, \quad (1.18)$$

де  $\Phi_{ВТБ}^a$  – активна частина фондів ВТБ, грн.;

$\Phi_{ВТБ}^n$  – пасивна частина фондів ВТБ, грн.

Значення  $\Phi_{ВТБ}^a$  і  $\Phi_{ВТБ}^n$  вибираються з таблиці 1.7.

Згідно з формулами (1.17 і 1.18):

$$C_a = (558 / 2314) \cdot 100\% = 24,11\%; \quad C_n = (1756 / 2314) \cdot 100\% = 75,89\%.$$

Фондоозброєність ремонтних робітників:

$$\Phi O = \frac{\Phi_{\text{ВТБ}}}{P_{\text{pp}}}, \quad \text{тис.грн./чол;} \quad (1.19)$$

де  $P_{\text{pp}}$  – чисельність основних і допоміжних ремонтних робітників;

$$\Phi O = 2192 / 15 = 146,13 (\text{тис.грн./чол.})$$

Аналіз стану ВТБ показує, що зони і ділянки СТО укомплектовані устаткуванням на 60 – 80 % від нормативу. Частина устаткування є фізично спрацьованим (приблизно 18%), воно підлягає оновленню, модернізації.

Аналіз техніко-експлуатаційних показників СТО показує:

1. кількість працюючих ремонтних і допоміжних робітників менша нормативної, що вказує на необхідність розширення персоналу, або підвищені продуктивності праці робітників за рахунок засобів механізації та автоматизації праці. При підвищені продуктивності праці з'явиться можливість обслуговування більшого числа автомобілів інших організацій і приватних осіб.
2. ВТБ забезпечена постами ТО і ПР на 100%.
3. ВТБ забезпечена площами виробничо-складських та допоміжних приміщень практично на рівні нормативу, стоянки на 100%, території на 100%, що дає можливість проведенню робіт по підвищенню ефективності використання ВТБ.
4. підприємство має недостатній рівень фондооснащеності, яка складає 90% від нормативних значень, визначених по нормативним питомим капіталовкладенням.
5. вартість ВТБ в основних фондах складає 50,0% при нормативних значеннях в 52 – 60%.
6. ОВФ підприємства мають таку структуру:
  - інвентар, інструмент – 21,17 %
  - машини і обладнання – 24,08 %
  - невиробничі фонди – 4,75 %

Таким чином доцільно на підприємстві провести вдосконалення ВТБ з вирішенням таких питань: поліпшити вікову структуру устаткування, збільшити вагу ВТБ в загальній вартості ОВФ за рахунок модернізації обладнання в зоні ТО і ПР, підвищити рівень механізації процесів, вдосконалити діючі засоби праці, розширити номенклатуру обслуговуваних автомобілів.

### 1.6 Аналіз існуючої системи і організації ТО і ПР

Роботи з технічного обслуговування і ремонту автомобілів можна класифікувати згідно з такими ознаками, як місце втручання на автомобілі, мета роботи, складність роботи і час її виконання.

В залежності від місця втручання на автомобілі це можуть бути роботи:

Контрольно-оглядові роботи.

Перевіряється: наявність сколів, тріщин і місць корозії лако-фарбового покриття кузова, пошкоджень мастики арок коліс і днища; робота дверей, стан елементів передньої і задньої підвісок, їх гумово-металевих шарнірів, втулок і подушок; стан рульових тяги, їх захисних ковпачків, захисних ковпачків, захисних чохлів рульового механізму, приводів коліс, пальців і шарніра тяги перемикачів передач; люфт стану демпфера; герметичність системи охолодження, живлення і гідравлічного приводу гальм, стан шлангів і трубок; герметичність ущільнень вузлів і агрегатів; рівень охолоджувальної рідини; стан натягнення ременів приводу генератора; рівень і щільність електроліту акумулятора; роботу генератора, освітлення, світлову і звукову сигналізацію, контрольні прилади, обігрівач, склоочисники, омивачі, обігрів заднього скла, систему запалення; встановлення моменту запалення; правильність роботи вузлів і деталей гідрокорректора фар; роботу економайзера примусового холостого ходу і пускового ходу карбюратора, терморегулятора повітряного фільтру; наявність сторонніх шумів і стукотів двигуна, зчеплення, коробки передач і валів приводу передніх коліс; вільний хід на важелі вилки виключення зчеплення або хід педалі зчеплення; ефективність роботи передніх гальм;

ефективність роботи задніх гальм; рівень масла в коробці передач; регулювання гальма стоянки і вільний хід педалі; працездатність вакуумного підсилювача гальм; працездатність термостата; працездатність регулятора тиску; стан зубчатого ременя приводу механізму газорозподілу; рівень гальмівної рідини.

Регулювальні роботи.

Підтяжка болтів кріплення головки блоку; комп'ютерну діагностику двигуна (для інжекторних двигунів); підтягти кріплення кришок розподільного валу; підтягти кріплення агрегатів, вузлів і деталей шасі; відрегулювати натягнення зубчатого приводу механізму приводу газорозподілу.

Інші роботи при ТО і ПР.

Очистити і промити деталі системи вентиляції картера; замінити елемент повітряного фільтру, що фільтрує; перевірити зазори в газорозподільному механізмі; відрегулювати роботу холостого ходу з контролем токсичності відпрацьованих газів; замінити масляний фільтр і масло в картері двигуна; замінити масло в коробці передач і картері заднього моста.

Замінити рідину охолодження; зачистити і змастити клеми акумуляторної батареї; відбалансувати колеса і переставити по схемі; відрегулювати кути установки передніх коліс; замінити зубчатий ремінь приводу газорозподільного механізму; замінити свічки запалення; зачистити контактні кільця генератора, перевірити знос і прилягання щіток; очистити і змастити деталі приводу стартера; зачистити контактні кільця генератора, перевірити знос і прилягання щіток; перевірити стан колодок передніх коліс; перевірити стан колодок задніх коліс; замінити гальмівну рідину; відрегулювати напрям світлових пучків фар (при необхідності); промити і продути деталі карбюратора, фільтри карбюратора і паливного насоса.

По потребі відрегулювати рівень пального в поплавцевій камері; замінити фільтр тонкого очищення пального; змастити:

- свердловини замку пробки заливної горловини паливного бака і дверей.
- шліцьові з'єднання карданного валу.

Прочистити дренажні отвори порогів і дверей; змастити петлі дверей; помити систему мащення двигуна.

Типові нормативи трудомісткості на ТО і ремонт наведемо у таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – Типові нормативи трудомісткості на ТО і ремонт

Найменування операції	Трудомісткість, нормо-год.	
	Автомобілі малого класу	Автомобілі середнього класу
1	2	3
1. Миття автомобіля	0,25	0,27
2. Регулювання кута запалення	0,07	0,07
3. Перевірка роботи зчеплення	0,16	0,16
4. Перевірка ефективності гальм	0,27	0,27
5. Перевірка системи запалення	0,57	0,1
6. Регулювання зазорів клапанів	0,45	0,6
7. Перевірка і балансування коліс	0,12	0,12
8. Перевірка і встановлення кутів передніх коліс	0,78	0,8
9. Ремонт електрогенератора	0,3	0,48
10. Зняття і установка картера зчеплення при знятій коробці передач	0,12	0,37
11. Повна антикорозійна обробка	5,1	6,0
13. Усунення середнього перекосу кузова	15	15
- складного	20	20
- нескладного	7,2	7,2
14. Заміна порога	4,0	4,0
15. Заміна крила	6,5	1,0

Організація ТО і ПР приватного транспорту має особливості, які необхідно враховувати при визначенні комплексу робіт по ТО і ПР, а саме:

- ТО і ПР в більшості випадків здійснюється на основі проведення діагностики, або відповідної заявки власника автомобіля;
- планово-попереджувальна система є, але для власника вона лише частково регламентує періодичність ТО і ремонту;
- перелік робіт по ТО і ПР пропонується власнику на основі діагностичних даних і сервісної книжки.

Потік документів при ТО і ремонті

Основними документами для проходження гарантійного та післягарантійного обслуговування на СТО є:

Запит попереднього узгодження гарантійного ремонту;

Замовлення на ремонт;

Сервісна книжка;

Заява власника.

Режим роботи СТО – однозмінний 8-ми годинний робочий день: понеділок – п'ятниця з 9 до 18, субота з 9 до 17. Обідня перерва 1 година на протязі робочого дня.

Один раз на рік робітники мають право на відпустки протягом 24 календарних днів (як правило – 12 днів в літній період, 12 – в зимовий).

Як у кожного підприємства, що працює в відповідному сегменті ринку є свої конкуренти. Основними конкурентами в сфері автообслуговування для даної СТО є приватні СТО та невеликі приватні майстерні м. Вінниці.

У малих майстерень собівартість ремонту нижча ніж у СТО що розглядається за рахунок відсутності накладних витрат так як у більшості випадків власник у своєму гаражі власними силами.

Так як СТО має висококваліфікованих спеціалістів, сучасне технологічне обладнання, що обумовлює високу якість виконуваних робіт та дозволяє надавати гарантію на виконану роботу, надані послуги.

Присутні також суттєві ознаки для позиціонування наданих послуг:

- скорочення часу, що витрачається на надання послуг;
- очікування споживача шляхом пропонування йому можливостей тимчасового використання іншого транспортного засобу, що є власністю самого підприємства;
- якість надання послуги.

Для поліпшення просування на ринку послуг цього підприємства необхідно застосовувати рекламу його послуг в пресі, на телебаченні, радіо, на вулицях міста, використовуючи плакати. Та основним джерелом реклами має бути авторитет якості надання послуг та обслуговування.

Ціни на послуги на СТО формуються на основі вартості нормо-години і коефіцієнтів:



$$Ц = T \cdot K \cdot B, \text{ грн.} \quad (1.20)$$

де  $T$  – нормативна трудомісткість ТО і ПР легкових автомобілів, нормо-годин;

$K$  – коефіцієнт на послугу;

$B$  – вартість нормо-години роботи, грн.

Вартість нормогодини на СТО:  $S = 195$  грн. Коефіцієнт на послуги: ТО і ПР вітчизняних автомобілів  $K = 0,8$ ; ТО і ПР іноземних автомобілів  $K = 1,0$ ; консультативні послуги  $K = 0,75$ .

Для стабільної роботи СТО необхідно розширити перелік послуг що надаються клієнтам, знизити собівартість послуг за рахунок підвищення механізації і зменшення часу виконання робіт. Це реалізується за рахунок вдосконалення виробничо-технічної бази, впровадження нових технологій, відмови від морально застарілого та використанням сучасного обладнання.

### 1.7 Висновки до розділу 1

В результаті проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1) основною причиною виходу з ладу підшипників в складі вузла електрогенератора є порушення роботи мастильного матеріалу;

2) в даний час для діагностування підшипникових вузлів широко використовуються вібраційні методи діагностики, засновані на принципах дії, що використовують механічну енергію, але як показав аналіз процесів і явищ, в зоні тертя, фізичні принципи на основі використання електричної енергії будуть більш інформативними і несуть інформацію про більшу кількість факторів, які впливають на стан підшипника, їх використання дозволить підвищити ефективність діагностування підшипникових вузлів;

3) на підставі аналізу недоліків використовуваних електрорезистивних методів, для підвищення їх ефективності, була сформульована мета дослідження:

підвищення ефективності діагностування підшипникового вузла автомобільного електрогенератора за рахунок оцінки його комплексного стану, виявлення дефектного підшипника по електричному опорі вузла на тлі дії ЕРС в зонах тертя.

4) проведений аналіз дозволив визначити, що електрорезистивний метод діагностування є перспективним для вирішення поставленого завдання визначення технічного стану автомобільного електрогенератора;

5) для забезпечення надійності підшипникового вузла електрогенератора необхідно контролювати режим тертя, в якому працюють підшипники вузла, так як в умовах рідинного тертя ресурс збільшується, а при граничному і напіврідинному зменшується, для визначення режиму тертя і розрахунку модифікованого ресурсу повинен використовуватися параметр НІЧ.

6) У результаті аналізу номінального ресурсу підшипникового вузла електрогенератора зроблено висновок про періодичність проведення діагностування та областях застосування.

7) Проведений техніко-економічний аналіз діяльності СТО показав, що площі земельної ділянки, виробничі площі та площі адміністративно-побутових приміщень дають можливість подальшого розвитку підприємства з метою покращення надання послуг обслуговування і ремонту автомобілів індивідуальних власників.

## РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДШИПНИКОВОГО ВУЗЛА ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА

Так як був обраний електрорезистивний метод діагностування, для оцінки технічного стану, визначено необхідність контролювання режиму тертя, який залежить не тільки від стану мастильного шару, але і від режиму роботи, стану контактуючих поверхонь, типорозміру підшипників, то потрібно виявити взаємозв'язок електричного опору підшипникового вузла і режимів тертя, з врахуванням впливу зовнішніх і внутрішніх факторів, з метою дослідження діагностичного сигналу і розробки методу діагностування, то необхідно провести теоретичні дослідження із застосуванням математичного моделювання.

### 2.1 Розробка узагальненої діагностичної моделі підшипника кочення на рівні геометричного і силового уявлення

Першим етапом розробки математичної моделі підшипника кочення є конкретизація об'єкта моделювання, визначення поверхонь, що беруть участь в дослідженні, визначення геометрії досліджуваних поверхонь, формування функціональних залежностей, що визначають епюри навантаження.

Поверхнями, які найбільше впливають на працездатність підшипника, є: поверхня тіла кочення, доріжки кочення внутрішнього і зовнішнього кілець, отже, для моделювання необхідно враховувати найбільш важливі властивості і характеристики цих поверхонь.

При контакті двох тіл, дотичні поверхні деформуються і місце контакту може прийняти форму еліпса, кола або прямокутника, однак, при контактуванні сферичного тіла кочення з поверхнею кільця підшипника, контакт відбувається по еліпсу [4].

Будь-яка поверхня має деяку ступінь шорсткості, але крім цього можуть бути присутніми макровідхилення [9]. На рисунку 2.1 показано схематичне зображення поверхонь, яке враховується при моделюванні.

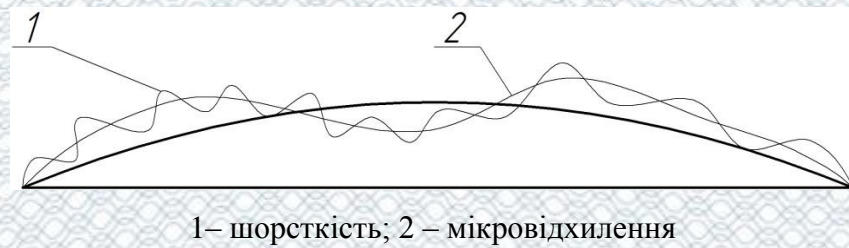


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення мікрогеометрії

Макровідхилення - це сукупність регулярно повторюваних, однакових за розмірами, виступів і западин, відстань між якими перевищує базову довжину, яка використовується для оцінки шорсткості. Шорсткість поверхні - сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками, виділена за допомогою базової довжини [ГОСТ 2789-73]. У зв'язку з тим, що відмінність в поняттях макровідхилення і шорсткості незначне і кордон між ними умовний, то вважають, що нерівності, у яких відношення кроку до висоти більше 40, відносяться до макровідхилень.

При цьому, поверхня утворює шорсткість сама має нерівності - субмікрошорсткості, утворена нерівностями висотою менше 20 нм. Згідно роботі [8] на рисунку 2.2 наведено класифікацію видів нерівностей поверхонь. При цьому макровідхилення є виступами першого роду, шорсткість - другого роду, субмікрошорсткість - виступи третього роду.

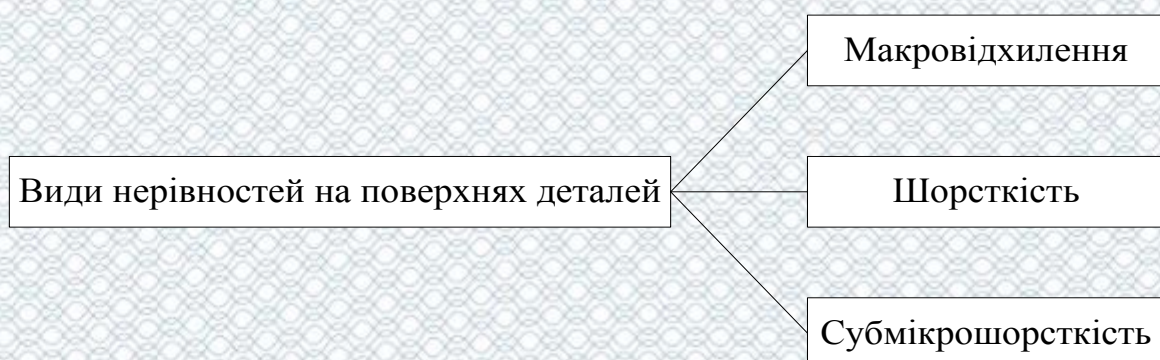


Рисунок 2.2 – Класифікація видів нерівностей поверхонь

В ході роботи підшипника кочення відбувається приробіток контактуючих поверхонь до тих пір, поки не встановиться деяке рівноважне значення шорсткості, оптимальне для даних умов тертя [8]. У зв'язку з цим, вважається,

що контактуючі робочі поверхні підшипника мають незначну різницю шорсткості [10].

Геометрія робочих поверхонь підшипника має переважно випадковий характер, викликаний впливом процесів механічної обробки, кінематикою подачі верстата, профілем ріжучого інструменту, випадкових факторів, також випадкова складова поверхні утворюється в процесі роботи підшипника при зносі. Крім випадкових складових у певних випадках можуть переважати періодичні складові в профілі поверхонь [10].

Для опису геометрії поверхонь деталей машин можуть бути використані закони розподілу: бета-розподіл, нормальний розподіл [25], розподіл Найак. Для опису шорсткості поверхонь ковзаючих електричних контактів може бути використано бета-розподіл. Нормальний закон розподілу може бути використаний для опису шорсткості сталевих шліфувальних деталей, в ролі яких зазвичай виступають підшипники кочення. В основі розподілу Найак лежить теорія випадкового поля [25], розподіл Найак в граничних випадках може вироджуватися в розподіл Релея і в нормальний розподіл. У другому випадку розподіл можна використовувати для опису геометрії прироблених і шліфованих поверхонь підшипника кочення. Для опису профілю тіл кочення і доріжок кочення в моделі обраний метод, заснований на гіпотезі про те, що висоти мікронерівностей мають нормальний розподіл, що є достатньою умовою для отримання математичної моделі [24]. Функція розподілу висоти мікронерівностей має вигляд функції:

$$f(h) = \frac{1}{\theta_R \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(h_m - a_R)^2}{2 \cdot \theta_R^2}}; \quad (2.1)$$

де  $\theta_R$  – середнє квадратичне відхилення висоти мікронерівностей;

$h_m$  – висота мікронерівностей;

$a_R$  – математичне очікування висоти мікронерівностей.

Середнє квадратичне відхилення профіля поверхні рівне середньому квадратичному відхиленню висоти мікронерівностей від її математичного очікування:

$$\theta_R = R_g; \quad (2.2)$$

де  $R_g$  – середнє квадратичне відхилення профілю.

В тому випадку, якщо профіль поверхні стаціонарний, і його можна розглядати, як випадкову функцію, а висота  $h$ ш мікронерівностей розподілена нормально, то [25]:

$$R_g = 1,25 \cdot R_a; \quad (2.3)$$

де  $R_a$  – середнє арифметичне відхилення профіля від середньої лінії.

Параметр  $a_R$  визначається по формулі:

$$a_R = R_{\max} - R_p; \quad (2.4)$$

де  $R_{\max}$  – найбільша висота мікронерівностей;

$R_p$  – висота зглажування.

Об'єднуючи формули (2.1) – (2.4), отримаємо:

$$f(h) = \frac{1}{1,25 \cdot R_a \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(h_{ш} - [R_{\max} - R_p])^2}{2,5 \cdot R_a^2}}; \quad (2.5)$$

В зв'язку з тим, що обидві поверхні реального підшипника кочення являються шорсткими, то для обліку їх мікрогеометрії скористаємося рівнянням [8]:

$$\begin{aligned}
 R_{\max} &= R_{\max 1} + R_{\max 2}; \\
 R_p &= R_{p1} + R_{p2}; \\
 R_a &= R_{a1} + R_{a2},
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

де  $R_{a1}$  - параметр шорсткості першої поверхні,

$R_{a2}$  - параметр шорсткості другої поверхні.

Зближення контактуючих гладких поверхонь  $\delta$ , відповідно теорії Герца, визначається [10]:

$$\delta = \frac{3}{2} \cdot \frac{2 \cdot K}{\pi \cdot n_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left( \frac{1 - \eta^2}{E} \right)^2 \cdot F_r^2 \cdot \sum \rho};
 \tag{2.7}$$

де  $\sum \rho$  – сума головних кривизн дотикаючихся тіл в початковій точці дотику,

$\eta$  – коефіцієнт Пуассона,

$F_r$  – радіальне навантаження,

$E$  – приведений модуль пружності,

$\frac{2 \cdot K}{\pi \cdot n_a}$  – табличний коефіцієнт [10].

З метою скорочення виразу (2.9) введем додатковий коефіцієнт:

$$a = \frac{3}{2} \cdot \frac{2 \cdot K}{\pi \cdot n_a} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{3} \cdot \left( \frac{1 - \eta^2}{E} \right)^2 \cdot F_r^2}.
 \tag{2.8}$$

Тоді вираз (2.9) прийме вигляд:

$$\delta = a \cdot \sqrt[3]{\sum \rho}.
 \tag{2.9}$$

При цьому  $\sum \rho$  може залежати від форми контактуючих тіл, їх розмірів:

$$\sum \rho = 2 \cdot (A + B); \quad (2.10)$$

де А, В - коефіцієнти, що визначаються формою і розмірами тіл [10]. У кулькових підшипниках відбувається дотик тіла кочення в двох областях - з внутрішнім кільцем і зовнішнім. Спрощена схема торкання приведена на рисунку 2.3.  $\sum \rho$  визначається за аналітичними виразами, що належать до контакту тіла кочення з зовнішнім кільцем і до контакту тіла кочення з внутрішнім кільцем.

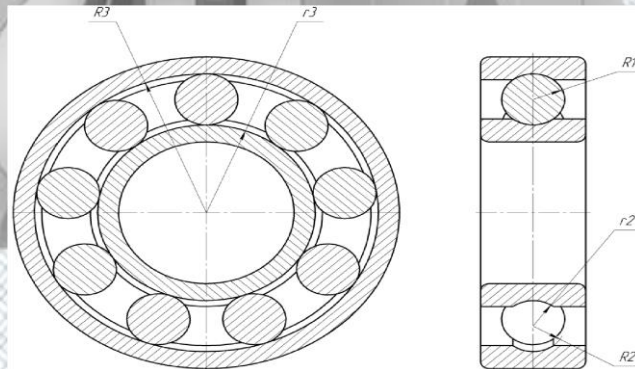


Рисунок 2.3 – Спрощена схема дотику робочих поверхонь підшипника

Формула для  $\sum \rho$  доріжки і тіла кочення внутрішнього кільця буде мати вигляд [10]:

$$\sum \rho = 2 \cdot (A + B) = 2 \left( \frac{r_3 - R_1}{2 \cdot R_1 \cdot r_3} + \frac{R_1 + r_2}{2 \cdot R_1 \cdot r_2} \right) = \frac{2}{R_1} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_2}; \quad (2.11)$$

де  $r_3$  – радіус жолоба доріжки кочення внутрішнього кільця ;

$r_2$  – радіус доріжки кочення внутрішнього кільця по дну жолоба;

$R_1$  – радіус тіла кочення.



Відповідно,  $\sum \rho$  тіла і доріжки кочення зовнішнього кільця:

$$\sum \rho = 2 \cdot (A + B) = 2 \cdot \left( \frac{R_3 - R_1}{2 \cdot R_1 \cdot R_3} + \frac{R_2 - R_1}{2 \cdot R_1 \cdot R_2} \right) = \frac{2}{R_1} - \frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_2}; \quad (2.12)$$

де  $R_3$  – радіус жолоба доріжки кочення зовнішнього кільця;

$R_2$  – радіус доріжки кочення зовнішнього кільця по дну жолоба.

Замінімо наведені вище радіуси на стандартні параметри підшипника кочення: діаметр  $D_w$  тіла кочення, діаметр  $d_2$  по дну жолоба зовнішнього кільця, діаметр  $d_3$  жолоба зовнішнього кільця, діаметр  $D_2$  по дну жолоба зовнішнього кільця, діаметр  $D_3$  жолоба зовнішнього кільця. Тоді вирази для розрахунку зближення зовнішнього кільця з тілом кочення  $\delta_H$  і внутрішнього кільця з тілом кочення  $\delta_B$  набуде вигляду:

$$\delta_B = a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{d_3} + \frac{2}{d_2}}. \quad (2.13)$$

$$\delta_H = a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{D_3} - \frac{2}{D_2}}; \quad (2.14)$$

Максимальний тиск в контактi  $p_0$  визначається з виразу [10]:

$$p_0 = \frac{1,5}{\pi \cdot n_a \cdot n_b} \cdot \sqrt[3]{\left[ E \cdot \sum \rho / 3 \cdot (1 - \eta^2) \right]^2 \cdot F_r}; \quad (2.15)$$

де  $R_{1m}$ ,  $R_{2m}$  – коефіцієнти, залежачі від кривизни контактуючих поверхонь;

$n_V$  – п'єзоекоефіцієнт вязкості мастильного матеріалу;

$\mu_0$  – динамічна вязкість;

$V$  – швидкість відносного переміщення контактуючих поверхонь.

Підшипниковий вузол електрогенератора є двохопорним, тому радіальне навантаження розподілиться між підшипниками (вирази 1.4, 1.5 [24]):

$$\begin{aligned} F_{r1} &= F_H \cdot (l_n + l_n) / l_n, \\ F_{r2} &= F_H \cdot l_n / l_n, \end{aligned} \quad (2.16)$$

де  $F_H$  – радіальне навантаження, Н;

$l_n$  – відстань від першого підшипника, до точки прикладення радіального навантаження, м;

$l_n$  – відстань між підшипниками, м.

Таким чином, в модель вводяться основні вирази для визначення приведених радіусів кривизни деталей підшипника, значення зближення при контакті шорсткуватих тіл, максимального тиску в зоні контакту.

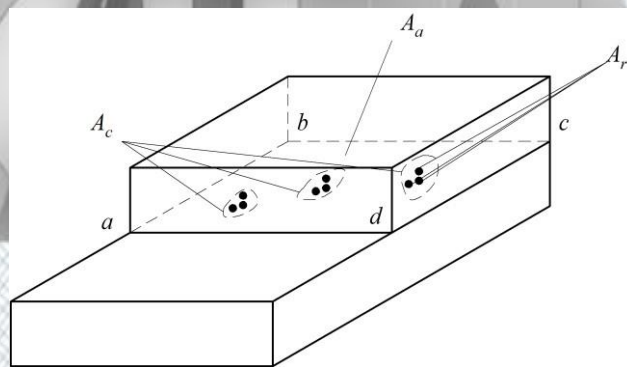
## 2.2 Математична модель трибоспряжень деталей підшипника кочення з урахуванням параметрів фактичного контактування, макро і мікрогеометрії

З огляду на те, що досліджувані поверхні мають шорсткість, яка є випадковою, то з урахуванням цього отримаємо [9]:

$$\delta_H = a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{D_3} - \frac{1}{0,5 \cdot (D_2 + R_{\max}) - h_{uu}}}; \quad (2.17)$$

$$\delta_B = a \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{D_w} - \frac{2}{d_3} + \frac{1}{0,5 \cdot (d_2 + R_{\max}) - h_{\text{ш}}}}. \quad (2.18)$$

Контакт тіла кочення з зовнішнім і внутрішнім кільцем відбувається за деякою площею, так як тіла не є абсолютно пружними і схильні до деформації, таким чином, електричний опір контакту залежить від фактичної площі контакту (рисунок 2.4) [8]. При цьому площі контакту класифікуються на номінальну, фактичну, контурну. Для підшипників кочення значення величини контурної площі буде визначатися розміром герцевських майданчиків. Величина фактичної площі може відрізнятись і становити десяті і соті частки відсотка, від площі номінальної, а від контурної - відсотки.



$A_r$  – фактична площа контакту,  $A_c$  – контурна площа контакту,

$A_a$  – номінальна площа контакту на ділянці  $abcd$

Рисунок 2.4 – Схема фрикційного контакту

Нехай в межах фактичної площі контакту немає об'єктів, що перешкоджають проходженню електричного струму, тоді вона повністю є електропровідною [9], тоді електричний опір зони контакту робочих поверхонь буде визначатися фактичною площею. Величина фактичної площі контакту залежить від параметрів шорсткості, технологічних режимів обробки, механічних властивостей матеріалів деталей, макро і мікрогеометрії. Тому, фактична площа контакту є випадковою величиною, яка залежить від законів розподілу матеріалу по висоті одиничного виступу, по висоті шорсткості.

Середня площа плям фактичного контакту визначається за виразом [1]:

$$A_r = 0,33 \cdot K_r \cdot r \cdot R_a \cdot (p_c / p_r)^{0,33}; \quad (2.19)$$

де  $K_r$  – коефіцієнт, залежний від виду контакту виступів,  $K_r=21$ ,  $K_r=11$  для пружного;

$r$  – приведений радіус заокруглення вершин нерівностей двох поверхонь;

$R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю;

$p_c$  – контурний тиск;

$p_r$  – фактичний тиск.

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}, \quad (2.20)$$

де  $r_1, r_2$  – приведений радіус нерівностей для першої і другої контактуючої поверхонь.

У зв'язку з тим, що поверхні неоднорідні, через наявність шорсткостей, макроотклоненій профілю, то фактичне число контактів різному і визначається:

$$n_r = \frac{3,1 \cdot A_c}{K_r \cdot r \cdot R_a} \cdot \left( \frac{p_c}{p_r} \right)^{0,66}, \quad (2.21)$$

де  $A_c$  – контурна площа контакту.

Для малих поверхонь контурна площа контакту буде рівна номінальній, тобто  $A_c = A_a$ , вираз для номінальної площі контакту:

$$A_a = \pi \cdot a_a \cdot b_a, \quad (2.22)$$

де  $a_a, b_a$  – напіввісі еліпса контакту.

Контурний тиск знаходиться з виразу [1]:

$$p_c = \frac{N}{A_c}. \quad (2.23)$$

Для контакту двох поверхонь пружна постійна матеріалу:

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2, \quad (2.24)$$

де  $\Theta_1, \Theta_2$  - пружні постійні контактуючих поверхонь.

$$\Theta_{1,2} = \frac{1 - \mu_{1,2}^2}{E_{1,2}}, \quad (2.25)$$

де  $E_{1,2}$  – модуль пружності;

$\mu_{1,2}$  - коефіцієнт Пуассона.

В першому наближенні для розрахунків тиску прийmemo, що  $H=HB=HV$ .

Критерій на індексі пластичності [24]:

$$\psi = \frac{E'}{H} \sqrt{\frac{\sigma'}{r}}, \quad (2.26)$$

де  $E'$  – приведений модуль пружності;

$H=H\min(H1, H2)$  - мікротвердість матеріалу;

$\sigma'$  – середнє квадратичне відхилення профілю відносно середньої лінії шорсткої поверхні;

$R$  – середній радіус заокруглення вершин.

Приведений модуль пружності для двох контактуючих поверхонь [24]:

$$E' = \left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}, \quad (2.27)$$

Середньоквадратичне відхилення профіля відносно середньої лінії шорсткої поверхні [24]:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot (Ra_1^2 + R_2^2)}. \quad (2.28)$$

В залежності від значення, яке приймає  $\sigma'$  можна судити про вид контакту:

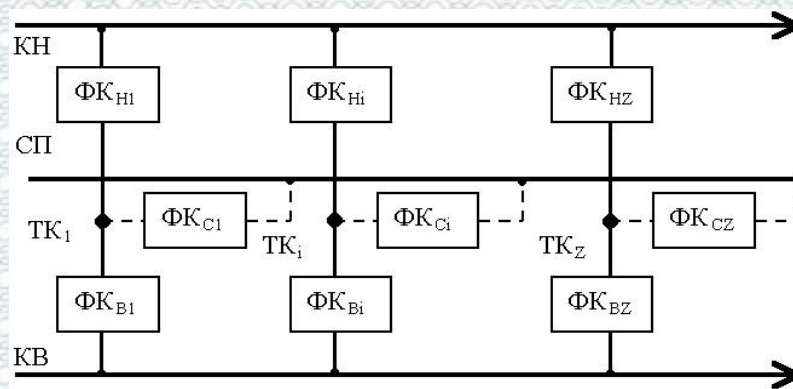
- $\psi < 0,6$  контакт пружний;
- $0,6 < \psi < 1$  пружнопластична деформація;
- $\psi > 1$  контакт пластичний.

Для випадку пружного контакту прийнято, що розрахунки слід виконувати як для пластичного контакту.

Представлені вирази дозволяють провести розрахунок параметрів контактної зони для будь-якого підшипника при сферичному тілі кочення. Для циліндричних тіл кочення використовується аналогічний підхід.

### 2.3 Моделювання електричного опору трибоспряжень

Сумарний опір зони тертя визначається опором вхідних в нього елементів, які представлені на електричній схемі заміщення на рисунку 2.5 [24].



ФКСі – фрикційні контакти і-го тіла кочення з зовнішнім кільцем, внутрішнім кільцем і сепаратором, ТКі – і-е тіло кочення; СП – сепаратор, КН, КВ – кільце зовнішнє і внутрішнє ФКНі, ФКВі, ПК – підшипник.

Рисунок 2.5 – Електрична схема заміщення підшипника кочення

Згідно представленої схемою заміщення сумарний опір зони тертя:

$$R = R_M + R_{OP} + R_A + R_{CT} + R_{СП}; \quad (2.29)$$

де  $R_M$  – електричний опір контактуючих тіл,

$R_{OP}$  – електричний опір оксидних плівок,

$R_A$  – електричний опір адгезійних плівок,

$R_{CT}$  – електричний опір стягування,

$R_{СП}$  – електричний опір мастильних плівок.

Опір  $R_M$  визначається питомим опором матеріалів деталей пари тертя, яке для сталей становить близько  $10^{-7} \dots 10^{-6}$  Ом·м, в порівнянні зі значеннями інших величин є дуже незначним і в подальших розрахунках може не враховуватися.

Опір окисних плівок визначається з виразу [21]:

$$R_{OP} = \frac{\rho_{OP} \cdot l_{OP}}{A_r \cdot n_r}. \quad (2.30)$$

Так як при пластичному контакті відбувається руйнування контактуючих нерівностей, то опір оксидних плівок враховується тільки при пружному контакті:

$$R_{OP} = \frac{\rho_{OP} \cdot l_{OP}}{A_r \cdot n_r}, \text{ якщо } \psi < 0,6;$$

$$R_{OP} = 0, \text{ якщо } \psi \geq 0,6. \quad (2.31)$$

$\rho_{OP}$  – питомий опір оксидної плівки,  $\rho_{OP} = 103$ , Ом·м;

$l_{OP}$  – товщина оксидної плівки,  $l_{OP} = 10^{-8}$ , м;

$A_r$  – середня площа фактичного контакту;

$n_r$  – фактичне число контактів.

В силу надмірності поверхневої енергії поверхневий шар має підвищену активність, ненасичені зв'язки атомів поверхневого шару активно взаємодіють з газами, парами води, рідинами і речовинами, розчиненими в них, в результаті чого поверхня покривається іншими видами плівок [9]. Для адгезійних плівок:

$$R_A = \frac{\rho_A \cdot l_A}{A_r \cdot n_r}. \quad (2.32)$$

Так як при пластичному контакті відбувається руйнування контактуючих нерівностей, то опір адгезійних плівок враховує тільки при пружному контакті:

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{\rho_A \cdot l_A}{A_r \cdot n_r}, \text{ якщо } \psi < 0,6; \\ R_A &= 0, \text{ якщо } \psi \geq 0,6. \end{aligned} \quad (2.33)$$

де  $\rho_A$  – питомий опір оксидної плівки;

$l_A$  – товщина адгезійної плівки,  $l_A=3 \cdot 10^{-10}$ , м [9].

При цьому, адгезійний шар має широкий склад, він складається з адсорбованих газів, вологи, мастильного матеріалу, переважним є шар мастильного матеріалу, тому його питомий опір прийемо як питомий опір адгезійного шару,  $\rho_A=1010$ , Ом·м [9].

Площа контакту мала і тільки обмежена частина проводить електричний струм, тому для двох контактуючих тіл має місце бути опір стягування [21]:

$$R_{CT} = \rho \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot n_{\Pi} \cdot r_{B(H)}} + \frac{1}{2 \cdot a_K} \right); \quad (2.34)$$

де  $n_{\Pi}$  – число п'ятен контакту в контактній зоні,

$r_{B(H)}$  – радіус п'ятен металічного контакту,



$a_K$  – радіус поверхні контакту.

Формула, яка враховує відхилення форми робочих поверхонь і деякі параметри мікрогеометрії має вигляд:

$$R_{CT} = \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{1}{n_{II} \cdot r_{B(H)}} + \frac{32}{3 \cdot \pi^2 \cdot n_K \cdot a_K} + \frac{32}{3 \cdot \pi^2 \cdot r} \right); \quad (2.35)$$

де  $n_k$  – число груп п'ятен металічного контакту (кластерів);

$r$  – радіус контура, охоплюючого сукупність кластерів.

Перший доданок впливає на опір стягування від одиничних плям, другий - від взаємодії їх в групі, третій - взаємодія плям в загальній площі.

Внаслідок того, що при роботі підшипника кочення в нормальних умовах, контурна площа контакту мала, відповідно до теорії Герца, то пружні властивості матеріалів в сукупності з наявністю стійкої гідродинамічної мастильної плівки роблять зближення поверхонь незначним, і тому, ймовірність одночасної появи в зоні тертя великого числа плям контакту, об'єднаних в групу, невисока. Значить, вплив другого і третього доданка виразу (2.35) дуже малий, і може не враховуватися, тоді формула для визначення опору стягування набуде вигляду:

$$R_{CT} = \frac{\rho}{2 \cdot n_{II} \cdot r_{B(H)}}. \quad (2.36)$$


Опір мастильних плівок:

$$R_{CT} = \frac{\rho_{нов}}{\pi \cdot n_{II} \cdot r_{B(H)}^2}; \quad (2.37)$$

де  $\rho_{нов}$  – питомий поверхневий опір (для плівок з тунельною провідністю  $\rho_{нов}$  залежить від їх товщини і складає 10-13...10-11 Ом\*м<sup>2</sup>).

Відповідно до роботи [6] опір граничних плівок менший опору товстих гідродинамічних шарів на кілька порядків. У товстих шарах мастильний матеріал - діелектрик, а питомий опір рідких мастильних матеріалів становить  $\rho_{см} = 105...1013$  Ом\*м, пластичних –  $\rho_{см} = 108...1022$  Ом\*м.

Для випадку, коли товщина мастильних плівок більша значення, при якому починається тунельний ефект, то активний опір визначається виразом [10; 24]:



$$\begin{aligned}
 R_{СТ} &= \frac{\rho_{нов}}{\pi \cdot n_{П} \cdot r_{В(Н)}^2}, \text{ при } 3 \leq h \leq 10 \text{ нм} \\
 R_{СТ} &= \rho_{ГП} \frac{h}{S_h}, \text{ при } 0,01 \leq h \leq 1 \text{ мкм}; \\
 R_{СТ} &= \rho_{СМ} \frac{h}{S_h}, \text{ при } 1 \leq h \leq 30 \text{ мкм};
 \end{aligned}
 \tag{2.38}$$

де  $\rho_{ГП}$  – питомий опір граничної мастильної плівки;

$\rho_{СМ}$  – питомий опір мастильного матеріалу;

$h$  – товщина мастильної плівки;

$S_h$  – площа, на якій товщина мастильної плівки рівна  $h$ ,  $S_h = A \cdot c$ .

При цьому, через те, що дотичні тіла не є абсолютно гладкими, то величина шорсткості є одним з факторів, що впливають на режим тертя. Режим тертя характеризується параметром мастильної плівки  $\lambda$  [22]

$$\begin{aligned}
 0 < \lambda < 1 &- \text{ граничне тертя;} \\
 1 \leq \lambda < 3 &- \text{ напіврідинне тертя;} \\
 3 \leq \lambda &- \text{ рідинне тертя;}
 \end{aligned}
 \tag{2.39}$$

Для визначення параметра  $\lambda$  використовують вираз [22]:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}}, \quad (2.40)$$

де  $h_0$  – товщина мастильного шару.

$$h_0 = \left( 1,82 - 0,68 \cdot \frac{R_{2m}}{R_{1m}} \right) \cdot (\mu_0 \cdot n_V \cdot V)^{0,75} \cdot \left( \frac{E \cdot R_{2m}}{P_0} \right)^{0,25}, \quad (2.41)$$

$R_{1m}, R_{2m}$  – коефіцієнти, визначаємі кривизною контактуючих поверхонь;

$\mu_0, n_V$  – відповідно, динамічна вязкість і пьезокоефіцієнт вязкості мастильного матеріалу;

$V$  – швидкість відносного переміщення контактуючих поверхонь.

Виходячи з виразу (2.38): для рідинного режиму тертя електричний опір зони тертя визначається товщиною мастильної плівки і буде значним; для напіврідинного режиму тертя товщини мастильної плівки буде недостатньо для запобігання контакту і опір буде залежати від опору стягування і опору поверхневих плівок; для граничного режиму тертя опір буде визначатися опором стягування.

## 2.4 Визначення опору опори тертя

Для випадку одночасного контакту підшипника кочення з внутрішнім і зовнішнім кільцем опір зони тертя визначається:

$$R_{II} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{\Sigma i}} \right)^{-1}; \quad (2.42)$$

де  $n$  – число навантажених тіл кочення,

$R_{\Sigma}$  – опір контакту кілець з тілом кочення.

При цьому  $R_{\Sigma}$  буде залежати від режиму тертя.

#### 2.4.1 Визначення опору контакту при граничному терті

Електричний опір стягування контакту кульки підшипника кочення з одним кільцем визначається для двох тіл [8]:

$$R_{CT} = \frac{\rho}{2 \cdot z \cdot r_k}; \quad (2.43)$$

де  $\rho$  – питомий опір пята контакту;

$z$  – число ймовірних контактів (п'ятен контакту);

$r_k$  – радіус пята контакту.

При цьому, якщо в (2.44) виконати ряд тотожних операцій, то можна зробити заміну змінних, для цього зведемо обидві частини виразу в квадрат:

$$R_{CT}^2 = \frac{\rho^2}{4 \cdot z^2 \cdot r_k^2}; \quad (2.44)$$

Помножимо чисельник і знаменник на  $\pi$ :

$$R_{CT}^2 = \frac{\pi \cdot \rho^2}{4 \cdot \pi \cdot z^2 \cdot r_k^2}; \quad (2.45)$$

Тоді в отриманому виразі:  $\pi r_k^2$  – середня площа одного контакту;  $\pi z r_k^2$  – фактична площа контакту  $A_f$ . Проводячи заміну змінних отримаємо:

$$R_{CT} = \frac{\rho \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{z \cdot A_r}}. \quad (2.46)$$

Цей вираз служить для визначення опору кульки тільки з одним кільцем, для розрахунку електричного опору зони тертя, що складається з кульки, внутрішнього і зовнішнього кільця визначається:

$$R_{\Sigma} = R_B + R_H. \quad (2.47)$$

де  $R_B$  – електричний опір контакту шарика кочення з внутрішнім кільцем підшипника кочення;

$R_H$  – електричний опір контакту шарика з зовнішнім кільцем підшипника кочення.

З огляду на те, що форма торкання поверхонь при контакті кульки підшипника з внутрішнім і зовнішнім кільцем будуть відрізнятися, то і вирази для  $R_B$  і  $R_H$  повинні бути різними і визначаються на основі (2.46).

#### 2.4.2 Визначення опору контакту при напіввідинному терті

У разі напіввідинного режиму тертя товщина мастильного матеріалу, є достатньою для поділу двох контактуючих поверхонь. При цьому, основна частина навантаження припадає на мастильну плівку, менша - на виступи мікронерівностей. На рисунку 2.6 показана спрощена модель контакту кульки підшипника з одним з кілець.

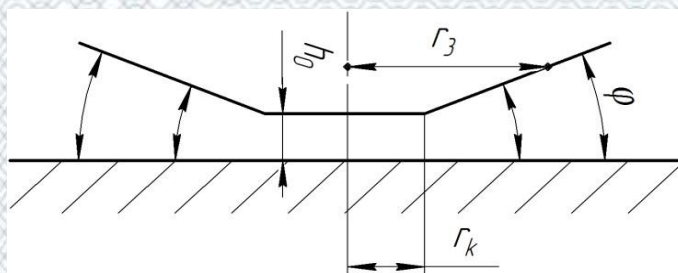


Рисунок 2.6 – Модель фрикційного контакту виступа поверхні

Пятно контакту, утворене одним виступом мікронерівності з великим радіусом кривизни, якщо кут нахилу  $\varphi$  буде малий, то утворюється пятно контакту з радіусом  $r_k$ , навколо якого буде знаходитися мастило. Нехай пятно контакту не проводить струм, тоді струм піде через зазор. Для випадку малих кутів  $\varphi$  елементарні трубки струму представляють собою пусті циліндри, для яких провідність визначається:

$$G_i = \sigma_{CM} \cdot \frac{S_i}{l_i}; \quad (2.48)$$

де  $\sigma_{CM}$  – питома провідність мастильного матеріалу;  
 $l_i$  – довжина трубки струму в мастильному матеріалі;  
 $S_i$  – площа поперечного перерізу трубки струму.

$$l_i = h_0 + (x - r_k) \cdot \varphi; \quad (2.49)$$

де  $h_0$  – мінімальна товщина масляної плівки.

По роботі [9] для змащеного контакту справедливе співвідношення:

$$\frac{G_M}{G_{CM}} = \frac{\sigma_M}{\sigma_{CM}} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r} \cdot \frac{h_0}{r_k}; \quad (2.50)$$

де  $G_M$  - провідність металу в зоні контакту;

$G_{CM}$  – провідність масляної плівки;

$\sigma_M$  – питома провідність металу.

Виконуючи перехід до опору:

$$\frac{R_M}{R_{CM}} = \frac{\rho}{\rho_{CM}} \cdot \frac{r_k}{h_0} \cdot \frac{A_c - A_r}{A_r}; \quad (2.51)$$

Виразимо опір масляної плівки:

$$R_{CM} = \frac{\rho_{CM}}{\rho} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r} \cdot R_M; \quad (2.52)$$

Опір  $R_M$  відповідає  $R_{CT}$ , тоді для напіврідинного тертя:

$$R_{СП} = \frac{\rho_{CM}}{\rho} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r} \cdot R_{CT}. \quad (2.53)$$

Радіус пятна контакту [10]:

$$r_k = n_a \cdot \sqrt[3]{3 \cdot (1 - \eta^2) \cdot F_r / E \cdot \sum \rho}. \quad (2.54)$$

Отримані вирази дозволяють визначити опір контакту при напіврідинному терті.

### 2.4.3 Визначення опору контакту при рідинному терті

При рідинному режимі тертя поверхні розділені шаром мастильного матеріалу і тоді, тоді згідно (2.52):

$$R_{CM} = \rho_{CM} \cdot \frac{h_0}{S_h}. \quad (2.55)$$

Для рідинного тертя електричний опір контакту буде визначатися параметрами мастильної плівки.

## 2.5 Теоретичний розрахунок моделей сигналів

Отримана модель дозволяє визначити електричний опір зони тертя в залежності від шорсткості контактуючих поверхонь деталей, швидкісного режиму, радіального навантаження, режиму тертя.

Для проведення розрахунків потрібно визначити геометричні параметри підшипника кочення, режим його експлуатації, задатися параметрами шорсткості доріжок кочення, вибрати мастильний матеріал. Далі для обраних параметрів визначається функція розподілу навантаження в зоні тертя, обчислюється число ймовірних контактів, фактична площа контакту, значення величини зближення поверхонь, отримані функції необхідні для розрахунку функції опору. Факт того, що функція опору є залежною від безлічі параметрів дозволить виявити ступінь їх впливу, виробити параметр, що дозволяє судити про якість підшипника кочення, виробити метод діагностування, для цього потрібно провести теоретичні дослідження.

### 2.5.1 Визначення умов чисельного експерименту

Для доказу адекватності отриманої математичної моделі можна скористатися двома методами: експериментальним і теоретичним. Суть експериментального методу полягає в тому, що досліджуваний об'єкт ставиться в ті ж умови, що і при моделюванні, записуються свідчення і порівнюються з даними, отриманими завдяки моделі. Суть теоретичного методу полягає в тому, щоб порівняти отримані дані з уже відомими і підтвердженими даними. Перший метод є більш достовірним, але вимагає матеріальних витрат на проведення досліджень. Другий метод потенційно поступається першому по достовірності, але є менш витратним і вимагає менше часу на реалізацію. На підставі



вищевикладеного скористаємося теоретичним методом для доказу адекватності і працездатності моделі.

Як об'єкт моделювання обраний радіальний кульковий підшипник 6302RS ГОСТ 8338-75. Рішення прийнято з таких міркувань:

- підшипник широко використовуються в машинобудуванні;
- підшипник аналогічний встановленим в електрогенераторі підшипників.

У таблицях 2.2, 2.3 відповідно, приведені конструктивні і допоміжні параметри моделюємого підшипника.

Таблиця 2.2 – Конструктивні параметри підшипників

Назва параметра	Значення параметра
Внутрішній діаметр, мм	15
Зовнішній діаметр, мм	42
Діаметр шарика, мм	7,8
Кількість шариків, шт.	9
Діаметр по жолобу внутрішнього кільця, мм	12
Діаметр по жолобу зовнішнього кільця, мм	20

Таблиця 2.3 – Допоміжні параметри підшипників

Назва параметра	Значення параметра
Питомий опір матеріалу тіл кочення і кілець, Ом*м	$1 \cdot 10^{-6}$
Питомий опір мастильного матеріалу (мастило МС-20), Ом*м	$1 \cdot 10^{10}$
Приведений модуль пружності, Н/м <sup>2</sup>	$2,08 \cdot 10^{11}$
Коефіцієнт Пуассона	0,33
Динамічна вязкість мастила, Н*с/м <sup>2</sup>	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Пьезокоефіцієнт вязкості мастильного матеріалу, м <sup>2</sup> /Н	$0,68 \cdot 10^{-7}$
Середнє арифметичне відхилення профіля поверхні від середньої лінії (параметр Ra), мкм	0,08

### 2.5.2 Моделювання сигналу опору

Припустимо, що поверхні деталей підшипника є ідеальними і не містять дефектів, мастильний матеріал відсутній, тоді навіть в цьому випадку електричний опір зони тертя не буде постійним: в підшипнику при русі одного з кілець і при впливі радіального навантаження, що має постійний вектор, в одночасному контакті з зовнішнім і внутрішнім кільцем буде знаходитися різне

число кульок, таким чином, електричний опір зони тертя буде змінюватися за гармонійним законом; так само електричний опір зони тертя буде змінюватися через те, що при русі кульок навантаження сприймається кожною з них буде відрізнятися в залежності від положення щодо точки прикладання радіального навантаження, таким чином, буде змінюватися площа контакту, що і призведе до зміни електричного опору зони тертя.

Для підтвердження цих теоретичних гіпотез було виконано моделювання електричного опору зони тертя підшипника кочення тип 6302RS ГОСТ 8338-75 для випадку обертання внутрішнього кільця щодо нерухомого зовнішнього, в результаті була отримана функція залежності опору  $R$  від кута  $\alpha$  положення сепаратора (2.43).

На частотах, кратних частоті ( $\omega c \cdot z$ ), виникають незначні гармонійні складові через функції опору від гармонійної, а також неточності чисельних методів моделювання. Таким чином, передбачуваний раніше характер зміни функції електричного опору зони тертя в часі підтверджується в ході моделювання проведеними розрахунками.

### 2.5.3 Дослідження впливу шорсткості контактуючих поверхонь на фактичну площу контакту

У число завдань моделювання входить оцінка ступеня впливу шорсткості контактуючих поверхонь на фактичну площу контакту  $A_f(\alpha)$  від кута  $\alpha$  повороту сепаратора щодо точки прикладення радіального навантаження.

У формулах, що беруть участь в описі моделі, присутні параметри мікрогеометрії контактуючих поверхонь, параметри профілю мікронерівностей. Для отримання результатів, адекватних експериментальним, потрібно обґрунтувати вибір значень параметрів мікрогеометрії.

Для проведення моделювання потрібно задатися початковим значенням шорсткості. В результаті обробки контактуючих поверхонь шорсткість доріжок кочення зовнішнього і внутрішнього кілець може становити  $R_{a1} = 0,06$  мкм [22],

в рамках моделювання зробимо припущення, що шорсткість доріжок і тіл качення:  $R_{a2} = R_{a1} = 0,06$  мкм. Так як в ході моделювання вивчається зміна шорсткості як функція опору, то дане значення приймемо за початок діапазону зміни шорсткості.

Для відшліфованих поверхонь доріжок качення відповідають параметри  $v_1 = v_2 = 3$ ,  $b_1 = b_2 = 1$  [1]. Приведений радіус кривизни вершин виступів поверхонь:  $r_1 = r_2 = 400$  мкм [1].

## 2.6 Спосіб отримання діагностичного параметра НІЧ

Визначивши значення електричного опору, потрібно визначити стан підшипників і їх можливості для забезпечення працездатного стану вузла. На підставі виразу (1.9):

$$\bar{K} = \left\{ 1 - \left[ 0,5 + \Phi(\lambda) \right]^{-9,27 g F_r^{2/3} \cdot 10^{-9}} \right\}^2, \quad (2.56)$$

визначення режиму тертя можливе за рахунок вимірювання параметра НІЧ, який може бути отриманий через безпосередній вимір і через розрахунок з сигналу опору:

$$\bar{K} = \frac{M}{N}, \quad (2.57)$$

де  $M$  – число значень, менш порогового значення  $R_d$ ;

$N$  – число значень.

$M$  - визначається наступним чином:

$$M = \text{card} \{ y | y \in X, y < R_d \}, \quad (2.58)$$

де  $X$  – множина значень опору;

$y$  – елемент множини, який задовольняє умові  $y < R_{П}$ ;

$R_{П}$  – порогове значення опору.

Вимірявши параметр НІЧ можливо зробити висновок про стан підшипникового вузла і визначити його ресурс.

## 2.7 Висновки до розділу 2

1. Розроблена математична модель дозволяє досліджувати вплив шорсткості контактуючих поверхонь тіл кочення і доріжок кілець при спільному або роздільному їх моделюванні, умов роботи (частота обертання, радіальне навантаження, мастильний матеріал, тип підшипника, параметри шорсткості контактуючих поверхонь) на функцію електричного опору підшипника кочення і зокрема в підшипниковому вузлі електрогенератора в цілому. При цьому, товщина мастильного шару розглядається як похідна величина від умов роботи.

2. Обмеженням для використання моделі є використання однорядних радіальних кулькових підшипників, приведені значення досліджуваної шорсткості контактуючих поверхонь не повинне перевищувати величину зазору між тілами кочення в точці контакту, максимальне радіальне навантаження 50 кН, частота обертання 10000 об<sup>-1</sup>, межа зміни  $R_a \in [0 ; 0,5]$  мкм; зроблено припущення, що в процесі моделювання значення шорсткості не змінюється, середнє арифметичне значення шорсткості контактуючих поверхонь рівні.

3. Електричний опір, як діагностичний сигнал, на який впливають шорсткість робочих тіл і доріжок кочення, умови роботи, товщина мастильного шару характеризує об'єктивно і комплексно якість підшипника.

4. Функція зміни опору працюючого підшипника в часі має характерну випадкову складову, яка несе інформацію про шорсткості тіл і доріжок кочення, детерміновану складову, що характеризує кінематику підшипника кочення.

5. Для оцінки технічного стану підшипникового вузла використовується діагностичний параметр НІЧ, одержаний розрахунковим шляхом з сигналу опору.

### РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ АВТОМОБІЛІВ

Розроблений електрорезистивний метод контролю стану двохопального підшипникового вузла електрогенератора автомобіля оснований на даних, отриманих в ході математичного моделювання та наявної апріорної інформації, а також на підставі проведеного аналізу фізичних процесів і явищ в зоні тертя підшипника кочення.

За результатами проведених досліджень можна виділити наступні положення методу контролю:

- так як термін служби підшипника кочення залежить від режиму мащення, то можна використовувати режими мащення як якісний показник стану підшипникового вузла, в свою чергу режим мащення так само залежить від стану якості контактуючих поверхонь;

- в ході теоретичних досліджень електричний опір зони тертя підшипника кочення розглядався, як функція від частоти обертання внутрішнього кільця, радіального навантаження, середнього арифметичного значення шорсткості контактуючих поверхонь, при цьому, залежність електричного опору від шорсткості контактуючих поверхонь, при незмінному значенні навантаження і частоти обертання дозволяє використовувати опір для винесення судження про якість контактуючих поверхонь, на тій підставі, що при незмінних швидкісних і силових параметрах електричний опір зони тертя переважно визначається опором мастильного матеріалу і залежить від його товщини, яку можна розрахувати, знаючи параметри діагностуємих підшипників кочення та умови їх роботи;

- аналізуючи сумарний електричний опір двохопального підшипникового вузла, а також на підставі матеріалів [24] можна говорити про те, що в умовах, коли не потрібно виділити який саме підшипник кочення є дефектним в вузлі, то досить визначити сумарний електричний опір, що діагностується, так як

результуючий опір буде набувати меншого значення, що дозволить визначити вихід за припустимі межі електричного опору одного з підшипників вузла.

При розробці методу контролю вирішуються наступні завдання:

- 1) експериментальне дослідження працездатності принципу діагностування;
- 2) розробка методу і засобів діагностування для визначення технічного стану вузла в цілому і визначення дефектного підшипника зокрема.

### **3.1 Експериментальне дослідження працездатності принципу діагностування**

В ході теоретичних досліджень в якості методу діагностування був обраний електрорезистивний метод, в ході теоретичних досліджень було сформульовано принцип діагностування - залежність електричного опору від умов роботи, які впливають на параметри зони тертя, що визначають електричний опір зони тертя, такі як число контактних майданчиків, їх число, площа, вид тертя, вид деформації контактів, і т.д. В ході експериментального дослідження була показана адекватність отриманої математичної моделі для одного підшипника, тепер проведемо серію дослідів, і доведемо що принцип діагностування зберігається і для двохопорного підшипникового вузла.

Потрібно провести апробацію для різних умов роботи. Так як було показано, що сигнал трибоспряжень може бути отриманий з сигналів складових його елементів [22], тому з метою скорочення витрат на дослідження експеримент проводився на одиничному підшипнику для різних умов, сигнал підшипникового вузла виходив комбінуванням отриманих сигналів між собою.

#### **3.1.1 Експериментальні дослідження працездатності принципу діагностування для двохопорного підшипникового вузла**

Для апробації принципу діагностування для двохопорного вузла потрібно

визначення експериментальної залежності між технічним станом підшипників кочення двохопороного вузла і їх електричним опором. Експериментальна установка на базі станда E-250-02 представлена на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Установка для проведення дослідів на двохопороному вузлі

Даний стенд призначений для діагностування автомобільних електрогенераторів і стартерів в умовах автотранспортних підприємств, станцій технічного обслуговування автомобілів ремонтних заводів, фірм, майстерень, навчальних закладах. Стенд моделює умови роботи об'єкта для дослідження його характеристик можлива перевірка на холостому ходу, під навантаженням, можлива перевірка реле-регуляторів, тягових реле стартерів, реле перервників, електроприводів агрегатів автомобіля, комутаційних реле, обмоток якорів та ін.

Технічні характеристики представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики станду E-250-02

Вимірювальна частота обертання, об-1	500-9500
Частота приводу станда, об-1	500-6000
Вимірювальна сила струму, А	0-5, 5-150, 150-500, 300-1000
Вимірювальна напруга, В	0,2-2, 2-20, 20-40
Вимірювальний крутний момент, Н·м	10-100
Вимірювальний електричний опір, Ом	1-100, 1-100000
Потужність при перевірці стартерів, кВ·А	20
Напруга діагностованого електрообладнання, В	12/24(14/28)
Тип перевіряємих генераторів	потужність до 6,5 кВт в режимі холостого ходу (х.х.) і під навантаженням величиною до 3 кВт зі струмом навантаження до 160А

Для проведення вимірювань стенд піддавався модернізації, був встановлений ртутний струмознімач, для отримання сигналу електричного опору з вала електрогенератора. На рисунку 3.2 представлений ескіз розміщення елементів.

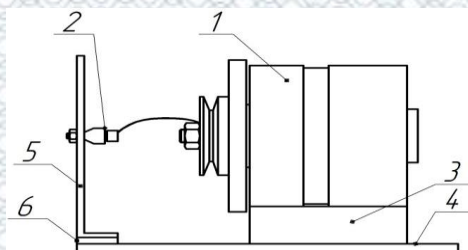


Рисунок 3.2 – Схема установки струмознімача

Генератор 1 з'єднаний з ртутним струмознімачем 2 проводом, закріпленим гайкою кріплення шківів, встановлений на станині 3 стенду. До корпусу стенду 4 струмознімач прикріплюється за допомогою кронштейна 5 і неодимового магніту 6.

На рисунку 3.1 представлено додаткове необхідне обладнання для проведення діагностування: первинний перетворювач сигналу електричного опору в сигнал напруги, джерело живлення для перетворювача, генератор Г6-43, цифровий осцилограф DSO-2090, для обробки отриманої інформації використовується ПЕОМ з необхідним програмним забезпеченням.

Виміри проводилися відповідно до схеми, представленої на рисунку 3.3. Проводяться окремі вимірювання електричного опору підшипника 1, 2. Спочатку за допомогою ключів 5, 6 підключається підшипник 1 до вимірювального ланцюга, на нього через струмознімач 2 подається електричний сигнал від джерела напруги.

Перетворювач опір-напруга (ПОН) формує сигнал електричного опору, пропорційний опору підшипникового вузла. Одночасно з сигналом опору з зовнішнього кільця підшипника кочення реєструється вібросигнал перетворювачем 3. ПКД здійснює збір даних про опір і вібрації і передає їх в ЕОМ.



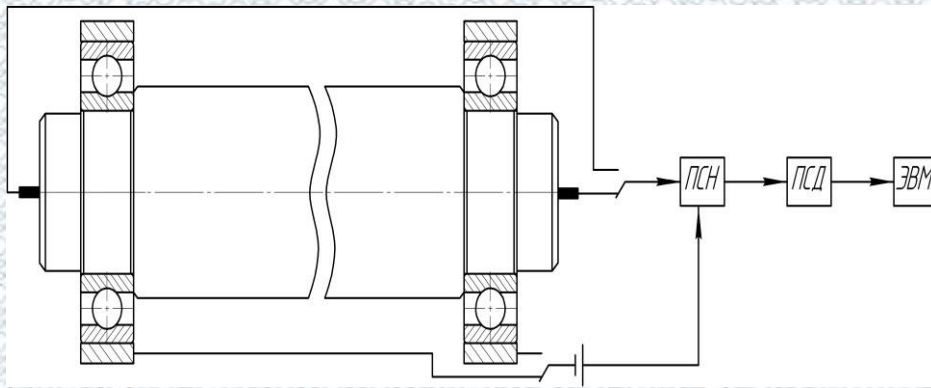


Рисунок 3.3 – Структурна схема експериментальної установки

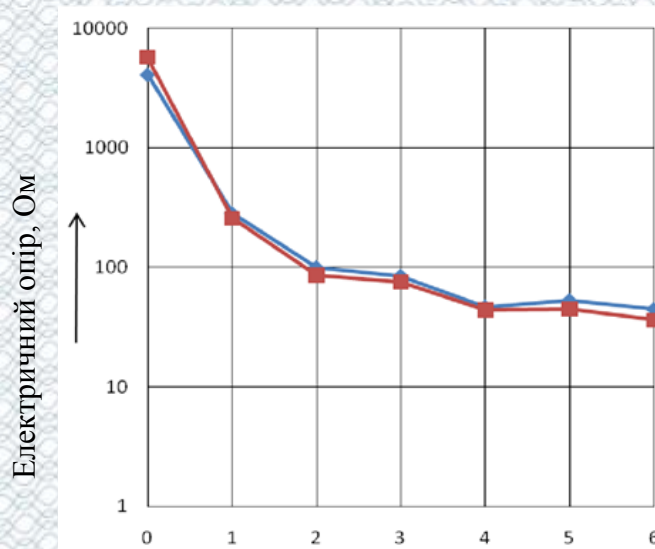
Тип використовуваних підшипників - тип 302 ГОСТ 8338-75, тип 102 ГОСТ 8338-75, мастильний матеріал - І-20, обсяг мастильного матеріалу - 0,15 мл, частота обертання -  $1100 \text{ об}^{-1}$ , напруга джерела живлення 1,4 В, баластний опір 1 кОм, 100 Ом.

Зміна якості контактуючих поверхонь передбачає зміну електричного опору підшипника кочення, досягти цього ефекту можна не тільки змінюючи якість поверхонь, але і змінюючи безпосередньо електропровідність мастильного матеріалу. Даний метод скорочує матеріальні витрати на придбання підшипників кочення.

Недоліком даного методу є неможливість побудови залежності між шорсткістю і електричним опором, але в даному експерименті не є необхідним, так як достатньо показати, що спрощення, прийняті при моделюванні для двохопного вузла не впливають на результат діагностування і запропонований метод діагностування є достовірним.

На рисунку 3.4 представлений графік залежності електричного опору досліджуваного підшипника двохопного вузла від обсягу забруднень в мастильному матеріалі.

Графітовий порошок додавався до існуючого в підшипник, в рівній кількості, збільшуючи процентний вміст в мастильному матеріалі. Таким чином, експериментально було показано, що принцип діагностування зберігається для двохопного підшипникового вузла.



Вміст графіту в мастильному матеріалі, %  
 \_\_\_\_\_ Середнє арифметичне, \_\_\_\_\_ СКО

Рисунок 3.4 – Графік залежності електричного опору підшипника двохопорного вузла від об'єму забруднення в мастильному матеріалі

## 3.2 Метод діагностування

### 3.2.1 Суть методу

Розроблюваний метод контролю двохопорного підшипникового вузла базується на обґрунтованому вище фізичному принципі дії, основні положення якого:

- внаслідок того, що до складу вузла входять радіальні підшипники кочення в кожен момент часу в зачепленні з внутрішнім і зовнішнім кільцем знаходяться не всі кульки, при обертанні сепаратора кожна з кульок проходить область зони навантаження, при переміщенні кульок через неї відбувається перерозподіл навантаження, що призводить до зміни електричного опору підшипника;
- зміна параметрів шорсткості контактуючих поверхонь підшипників в складі вузла призводить до зміни товщини мастильного шару, що розділяє їх, та впливає на режим тертя і на величину електричного опору підшипника;

- зміна частоти обертання внутрішнього кільця підшипника кочення, радіального навантаження веде до зміни товщини мастильного шару, що розділяє його робочі поверхні, та веде до зміни режиму тертя і величини електричного опору;

- на підставі вимірювання діагностичного параметра НІЧ робиться висновок про технічний стан вузла, робиться прогноз його ресурсів;

- для різних видів підшипників теоретичні графіки зміни параметрів QR розрізняються;

- підшипники в двохопорному вузлі тертя електрично з'єднані паралельно, таким чином, його сумарний електричний опір визначається меншим з опорів, тому за загальним опором вузла можна судити про стан одного з підшипників.

При розробці методу діагностування вирішуються завдання:

- 1) розробка алгоритму проведення процедури вимірювання електричного опору двохопорного підшипникового вузла;
- 2) розробка алгоритму обробки отриманих експериментальних даних;
- 3) розробка алгоритму визначення якісного стану вузла;
- 4) розробка алгоритму визначення дефектного підшипника в вузлі тертя.

### 3.2.2 Методика діагностування

#### 3.2.2.1 Алгоритм процедури вимірювання електричного опору

Об'єктом діагностування є вузол тертя. Так як діагностика є тестовою, то необхідно переміщення двохопорного підшипникового вузла на випробувальний стенд з можливістю відтворення умов його роботи.

Для проведення вимірювання електричного опору потрібно підключити вузол до пристрою вимірювання його електричного опору.

Умови проведення вимірювання:

1. Електрична ізоляція вузла від інших джерел напруги (стійкість пристрою вимірювання дозволяє знизити вплив малих напруг на результат вимірювання, значні зовнішні сигнали можуть пошкодити пристрій);

2. Частота дискретизації АЦП повинна бути не менше 1 МГц, з можливістю запису сигналу протягом часу, рівного одному обороту вала вузла.

3. Вплив зовнішнього електромагнітного поля має бути мінімальним. Перед проведенням вимірів потрібно підключити АЦП до вузла, включити установку на холостому ході, виміряти рівень перешкод і якщо він є істотним, SNR < 40 дБ, провести екранування.

4. Кращим є використання пристроїв з автономним джерелом живлення для зменшення впливу перешкод від мережі живлення. На вхід АЦП подається синусоїдальний сигнал з частотою 10 МГц.

Важливим елементом процедури вимірювання є оцифровка даних для подальшого аналізу за допомогою ЕОМ. Плати збору даних і цифрові осцилографи з безперервним записом сигналу і високою частотою дискретизації досить дорогі, а пристрої з дискретним принципом запису сигналу не дозволяють проводити запис сигналу необхідної тривалості з високою частотою дискретизації.

Тому, для зменшення вартості готового виробу пропонується реалізувати стробоскопічний принцип запису сигналу. Вважаючи, що макрогеометрії, яка робить основний вплив на діагностичний сигнал, є квазістаціонарним, то можна записувати діагностичний сигнал на невеликих ділянках, починаючи новий запис на новому обороті, з місця закінчення запису попереднього сигналу.

Тоді час вимірювання:

$$T = \frac{N \cdot (T_n + T_m + \Delta T)}{n}, \quad (3.1)$$

де  $T_n$  – час передачі даних, с;

$\Delta T$  – додатковий час затримки, с;

$N$  – число вимірювань,

$n$  – число обертів сепаратора в хвилину,

$T_u$  – час одного вимірювання, с.

Число вимірів:

$$N = \frac{T_c}{T_m}, \quad (3.2)$$

де  $T_c$  – час оберту сепаратора, с.

### 3.2.2.2 Алгоритм обробки отриманих експериментальних даних

В результаті виконання дій виконаних вище буде отриманий масив даних, оцифровані сигнали пристрою діагностування, які потрібно відновити, так як частота дискретизації нижче вихідного сигналу і перетворити сигнал напруги в сигнал опору, так само потрібно виключити помилкові значення, які могли виникнути в процесі вимірювання.

Файл даних, отриманих з АЦП, повинен містити сигнал з виходу смугового фільтра і з генератора синусоїдальної напруги.

Укрупнений алгоритм обробки отриманих даних з АЦП.

1. За отриманим файлом відновити синусоїдальний вигляд сигналів, так як через знижену частоту дискретизації була втрачена частина інформації.
2. За відновленим сигналом отримати сигнал різниці фаз.
3. За розрахунковою формулою перетворити сигнал різниці фаз в сигнал опору.
4. Виключити помилкові значення.

В ході вимірювання можуть виникнути значно відмінні від середнього значення детермінованого сигналу поодинокі значення. Для визначення того, чи є дане значення випадковим або детермінованим, викликаним не перешкодою або недостатньою частотою дискретизації, а якісним станом опори кочення, і було отримано 30 [5] серій сигналів.

Так як якісний стан робочих поверхонь підшипників кочення вузла є постійно мінливим, то сигнали електричного опору будуть відрізнятися, при збереженні деякої детермінованої складової.

В рамках кожної серії експериментальних даних потрібно виключити помилкові значення. Отримавши значення параметра НІЧ для кожної серії виключити помилкове значення НІЧ.

Так як спочатку невідомий закон розподілу отриманих експериментальних даних, то для виявлення помилок слід скористатися нерівністю Чебишева [28]:  $P \geq 1 - 1/t^2$ .

Незалежно від закону розподілення, задавшись ймовірністю  $P$ , можна знайти параметр  $t$ , і якщо спірний результат вимірювання відрізняється від  $Q_n$  більше ніж на  $t S Q$ , то він визнається помилковим.

5. Зробити висновок про технічний стан підшипникового вузла.

Висновок робиться виходячи з таких міркувань. Отримане значення параметра НІЧ дозволяє розрахувати параметр мастильної плівки з виразу (1.6).

Значення параметра  $\lambda$  відповідає видам тертя [9] (вираз 2.51):

$0 < \lambda < 1$  – *граничне тертя*;

$1 \leq \lambda < 3$  – *напіврідинне тертя*;

$3 \leq \lambda$  – *рідинне тертя*;

На підставі ефекту, що впливає на швидкість зносу, режимам тертя буде відповідати стану вузла: граничне тертя - не придатний, напіврідинне тертя - обмежено придатний, рідинне тертя - придатний.

3.2.2.3 Розробка алгоритму визначення дефектного підшипника в вузлі тертя

Для цього необхідно підключення об'єкта діагностування. Алгоритм визначення дефектного підшипника:

1. Встановити електрогенератор.
2. Включити установку з заданими параметрами умови роботи.
3. Провести вимірювання.

4. Провести аналіз отриманих даних на предмет наявності помилок.
5. Провести аналіз отриманої інформації для визначення дефектного підшипника. Судження по дефектному підшипнику виносяться на підставі порівняння фазових характеристик отриманих сигналів.
6. Провести розбирання електрогенератора і замінити підшипник.
7. Повторити процедуру визначення технічного стану вузла, якщо він прийнятний, то робота виконана.

### 3.3 Розробка засобів діагностування

Метою діагностування є визначення технічного стану вузла і визначення дефектного підшипника. Одним з рішень є отримання сигналу від кожного з підшипників. Розглянемо існуючі методи розділення інформації.

Для діагностики підшипників колінчастого вала запропоновано почергове комутування підшипників, що піддаються найбільшому навантаженню. Мінусом даного методу є вузька область застосування.

Іншим методом, який отримав поширення, є спектральний аналіз діагностичних сигналів, в якому поділ інформації оснований на тому, що у сепараторів підшипників буде різна частота обертання, що робить можливим розрізнення сигналів. Недоліком цього методу є складність поділу інформації при близьких частотах обертання і можливість накладення спектральних складових.

Так само є рішення, основані на дискретному зонально-селективному методі сканування. В основі методу покладено контроль частоти обертання сепаратора, що в умовах діагностування закритого електрогенератора є важко здійснимим процесом.

В роботі [5] поділ інформації оснований на формуванні складного силового діагностичного впливу на досліджуваний об'єкт, тоді тільки один з підшипників вузла буде під навантаженням при відсутності сигналу з другого. Недоліком є складність технічної реалізації.

Крім цього запропонований метод, заснований на використанні мостової схеми включення підшипникового вузла (рисунок 3.5) [24].

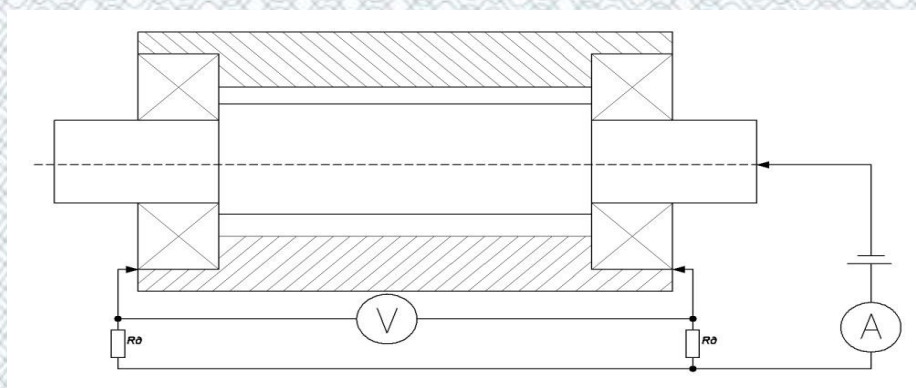


Рисунок 3.5 – Пристрій для діагностування підшипникового вузла

Недоліком даного методу є не захищеність від впливу ЕРС в зоні тертя.

Проведемо розробку пристрою для вимірювання електричного опору двохопного вузла, пристрою для визначення дефектного підшипника.

### 3.3.1 Розробка пристрою вимірювання електричного опору

Так як в якості вимірюваної величини було вибрано електричний опір, то в якості засобу діагностування повинен виступати перетворювач сигналу опору в сигнал зручний для передачі, зберігання, подальшої обробки.

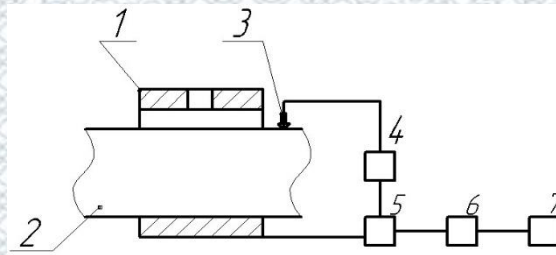
#### 3.3.1.1 Огляд аналогів

Проведемо огляд аналогів і визначимо склад і принцип дії пристрою, виділимо загальні риси, недоліки і переваги. Нижче наведено огляд пристроїв, що вимірюють електричний опір в вузлі підшипника.

На рисунку 3.6 представлена функціональна схема реалізації алгоритму оцінки шорсткості робочих поверхонь яка дозволяє, за допомогою вимірювання параметра середнього електричного опору оцінити величину рівноважної шорсткості робочої поверхні.



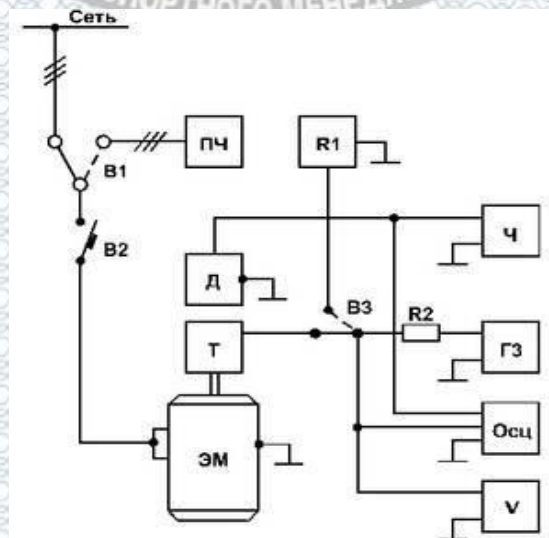
Електричний струм з пристрою 4 подається через струмознімач 3 на вал, в системі вал-опора відбувається падіння напруги, що знімається через корпус опори ковзання і надходить на блок перетворення сигналу 5 для зменшення впливу шумів і приведення рівня сигналу до допустимого рівня. Далі сигнал надходить на пристрій для оцифровки сигналу 6 для фіксування його значення. Обробка його і індикація відбувається в блоці 7.



1 – корпус; 2 – вал; 3 – струмознімач; 4 – джерело струму; 5 – блок претворення сигналу; 6 – пристрій для оцифровки сигналу; 7 – пристрій обробки інформації

Рисунок 3.6 – Функціональна схема

На рисунку 3.7 приведена схема вимірювання електричного опору масляних шарів в підшипниках електричних машин з виходом вала [5].

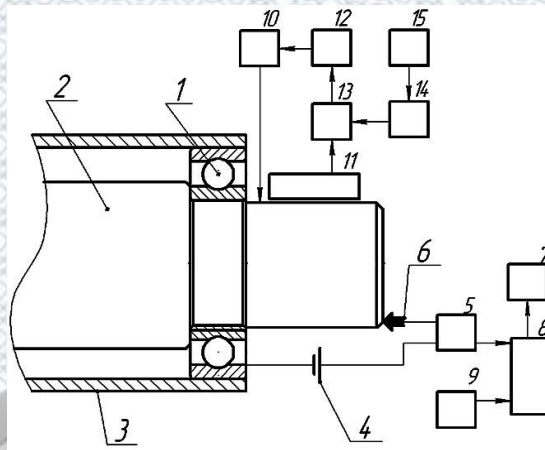


В1, В3 – перемикачі; В2 – вимикач автоматичний; ЭМ – електрична машина; Т – струмознімач; Д – датчик обертів; Ч – частотомір; ГЗ – генератор звукової частоти; Осц – осцилограф; У – вольтметр; R1 – магазин опорів; R2 – резистор; ПЧ – перетворювач частоти

Рисунок 3.7 – Структурна схема IBK 7607

Для визначення розриву мастильного шару використовується критерій різкого зменшення падіння напруги між валом і корпусом.

На рисунку 3.8 представлена структурна схема пристрою пошуку дефектів тіл кочення [16].



1 – контролюємий підшипник; 2 – вал; 3 – корпус; 4 – джерело напруги; 5 – формувач імпульсів; 6 – струмозйомник; 7 – лічильник; 8 – часовий селектор; 9 – генератор опорної частоти; 10 – пристрій навантаження; 11 – датчик кутового положення; 12 – блок управління; 13 – генератор; 14 – блок затримки; 15 – одновібратор

Рисунок 3.8 – Пристрій для пошуку дефектів тіл кочення

Ланцюг формування електричного сигналу, який несе інформацію про значення контрольованого параметра містить джерело постійної електричної напруги 4, формувач імпульсів 5 і здійснюють контакт з рухомими деталями підшипника кочення (ПК) струмозйомники 6. Він перетворює імпульси провідності ПК 1 при мікроконтактуванні в прямокутні імпульси напруги тієї ж тривалості з рівнем логічної одиниці на виході формувача 5. Сигнал, пропорційний параметру, формується за допомогою лічильника 7, тимчасового селектора 8 і генератора опорної частоти 9. Сканування в умовах тестового контролю здійснюється за допомогою додаткового приводу (на рисунку не показаний), який переміщує контрольовану поверхню щодо вектора радіальної складової навантаження, пристроєм радіального навантаження 10, які реалізують заданий закон навантаження об'єкта при контролі. Пошук дефектів в умовах робочого контролю з алгоритмом дискретного зонально-селективного

сканування передбачає наявність додаткових вимірювальних каналів (11-15) для отримання інформації про поточне взаємне розташування контрольованої поверхні і вектора радіального навантаження.

Для формування структури розроблюваного пристрою виділимо загальні блоки: струмознімач; джерело струму (напруги); блок перетворення сигналу. У зв'язку з цим лінія перетворення сигналу набуде вигляду: через струмознімач сигнал подається на об'єкт контролю, далі падіння напруги на ньому проходить обробку, отриманий сигнал проходить через блок перетворення сигналу, далі через лінію зв'язку надходить на подальшу обробку. Обробка сигналу полягає у виділенні серед перешкод корисного сигналу, отримання сигналу пропорційного опору.

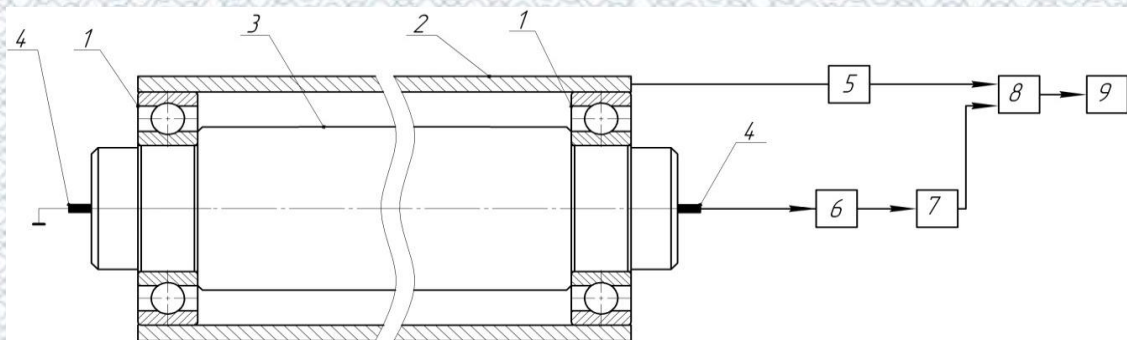
Недоліком розглянутих вище пристроїв є наступне. Для перетворення сигналу електричного опору в напругу використовується закон Ома, коли знаючи значення падіння напруги на підшипнику кочення і значення струму, що протікає через нього, можна визначити електричний опір підшипника кочення. При цьому, в трибоспряженнях генерується ЕРС, яке буде вносити невизначеність в результат вимірювання електричного опору. Таким чином, достовірність діагностування при використанні відомих пристроїв обмежена.

Таким чином, завданням розробки пристрою є підвищення ефективності діагностування підшипникового вузла за рахунок зменшення впливу ЕРС в трибоспряженнях.

### 3.3.1.2 Розробка структурної схеми

Для вимірювання опору підшипника, з мінімізацією генерованої ним ЕРС, пропонується структурна схема, яка реалізує вимір, зображена на рисунку 3.9. Пристрій вимірювання електричного опору підшипникового вузла, що включає в себе підшипники 1, корпус 2, вал 3, містить ртутні струмозйомники 4, через які відбувається подача гармонійного сигналу з генератора 5, фазовий фільтр 6, який дозволяє отримати сигнал пропорційний опору вузла, смуговий фільтр 7 виділяє

корисний сигнал з частотою сигналу з генератора 5, перемножувач 8, перетворює сигнали з генератора 5 і смугового фільтра 7 в один сигнал, пропорційний електричному опору вузла, який надходить на ЕОМ 9.



1 – підшипник, 2 – корпус, 3 – вал, 4 – струмозійомник, 5 – генератор синусоїдальної напруги, 6 – фазовий фільтр, 7 – полосовий фільтр, 8 – перемножувач, 9 – АЦП

Рисунок 3.9 – Структурна схема

Вал 2 обертає внутрішні кільця підшипників 1, в результаті проходження тіл кочення через область навантаження відбувається зміна електричного опору; різниця фаз між вхідним сигналом, що надходить з генератора 5 і вихідним сигналом фазового фільтра 6 залежать від електричного опору вузла, включеного в його зворотний зв'язок. Вузкосмуговий фільтр 7 виділяє з спектра частот сигнал, що надходить з виходу фазового фільтра 6, сигнал з частотою сигналу формованою генератором синусоїдальної напруги 5, який дозволяє позбутися від перешкод, що виникають в підшипниках кочення 1 зовнішнім електромагнітним випромінюванням. Перемножувач 8 виконує функцію перетворення різниці фаз між сигналами з генератора синусоїдальної напруги 5 і вузкосмугового фільтра 7 в сигнал, пропорційний електричному опору підшипників кочення 1, який надходить на АЦП 9 для перетворення в цифровий сигнал для передачі, зберігання і подальшої обробки. Таким чином, сигнал на виході АЦП 9 пропорційний значенню електричного опору, який несе об'єктивну інформацію про якість контактуючих поверхонь.

У зонах тертя підшипників вузла генерується ЕРС, яке для вихідного сигналу фазового фільтра виступає в ролі напруги зсуву, а так як вхідний сигнал має постійну частоту, то використовуючи смуговий фільтр можливо виділити

корисний сигнал і зменшити вплив ЕРС. Перевагою розроблювального пристрою є можливість вимірювання електричного опору як одного підшипника, так і двохопорового підшипникового вузла, що розширює сферу застосування.

### 3.3.1.3 Розробка функціональної схеми

Отримаємо функціональні залежності, виходячи з призначення блоків.

Передавальна функція фільтра [18]:

$$A(j\omega) = \frac{1 - j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}, \quad (3.3)$$

де  $R, C$  – значення опору і ємності відповідно

Різниця фаз між вхідним і вихідним сигналом [18]:

$$\Phi_{\phi}(R_n) = -2 \arctg(\omega \cdot R \cdot C). \quad (3.4)$$

Амплітуда полосового фільтра:

$$A = \begin{cases} 1, & \text{при } f = f_r \\ 0, & \text{при } f \neq f_r \end{cases} \quad (3.5)$$

де  $f$  – частота сигналу,

$f_r$  – резонансна частота.

Функція ідеального перемножувача [18]:

$$U_{\text{вих}}(\Phi) = \frac{K}{2} U_c \cdot U_{\text{он}} (\cos(2 \cdot \omega \cdot t + \phi) + \cos(\phi)), \quad (3.6)$$

де  $U_{\text{он}}$  – амплітуда сигналу, виробляючого генератором;

$U_c$  – амплітуда сигналу пройшовшого полосовий фільтр,  
 $k$  – коефіцієнт підсилювача перемножувача,  
 $\phi$  – різниця фаз.

### 3.3.1.4 Аналіз фазового фільтра

В якості фільтра використовуємо схему, зображену на рисунку 3.10 [18].

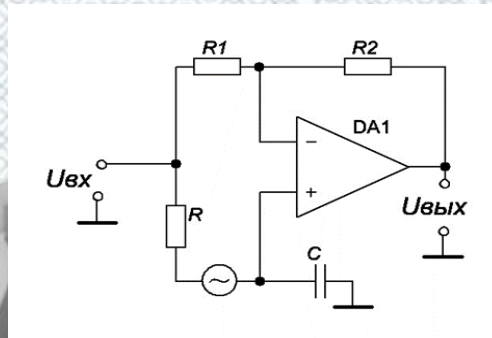


Рисунок 3.10 – Фазовий фільтр

Передаточна функція фільтра [18]:

$$A(j\omega) = \frac{1 - j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}, \quad (3.7)$$

де  $R, C$  – значення опору і ємності відповідно.

$$RC = 0,6436 / 2\pi f_g, \quad (3.8)$$

$$\Phi_\phi(R_n) = -2 \arctg(\omega \cdot R \cdot C). \quad (3.9)$$

$$R = R_n + R_\delta,$$

де  $R_n$  – опір підшипника;

$R_\delta$  – баластний опір.

Для знаходження значень елементів  $R$ ,  $C$  потрібно задатися діапазоном зміни фази. На нього впливає необхідність отримання мінімальної похибки нелінійності перемножувача, вплив зсуву фази фільтром смуговим, нелінійність фазового фільтра, неточність діапазону зміни фази.

Електричний опір підшипника є комплексним, так як через наявність мастильної плівки в зоні трибоспряження присутня електрична ємність, яка може становити від десятків, до сотень пФ [27], [28].

Так як схема заміщення являє собою паралельний опір еквівалентних ємності і опору [28], то комплексний опір буде набувати менших значень, при високій частоті несучого сигналу що відповідає не менше  $1 \text{ МГц}$  і гідродинамічному режимі мастила реактивна складова буде близько  $1 \text{ кОм}$ , а активна складова, обумовлена електричним опором від  $\text{кОм}$ , до  $\text{Мом}$ , і комплексний опір буде набувати менших значень, які будуть більшими порогового значення, а так як мікроконтакт відбувається при граничному і напіврідинних режимах тертя, коли місткість складова буде незначною, то вона не буде мати істотного впливу на результат вимірювання.

### 3.3.1.5 Аналіз смугового фільтра

Смуговий фільтр повинен мати можливість забезпечити високе значення добротності, аналізуючи схеми і їх характеристики, можна зробити висновок, що найбільше підходить схема, зображена на рисунку 3.11 [18].

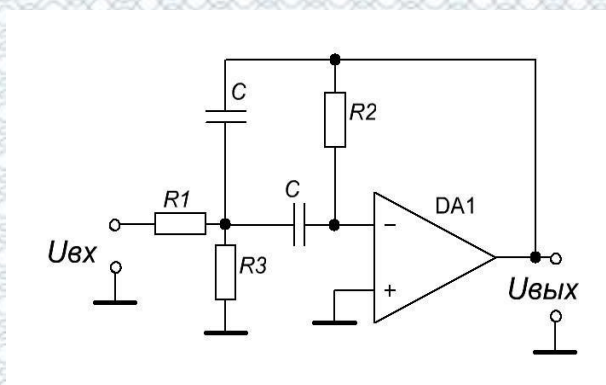


Рисунок 3.11 – Схема електричного полосового фільтра

Для забезпечення найбільшого ослаблення сигналів на потрібній частоті несуча частота повинна бути більшою максимальної частоти сигналів, викликаних мікроконтактуванням, добротність повинна володіти високим значенням.

Опір  $R_2$  [18]:

$$R_2 = \frac{Q}{\pi \cdot f_r \cdot C}, \quad (3.10)$$

Резистор  $R_1$  [18]:

$$R_1 = \frac{R_2}{2 \cdot A_r}. \quad (3.11)$$

Резистор  $R_3$  [18]:

$$R_3 = \frac{A_r \cdot R_1}{2 \cdot Q^2 - A_r}, \quad (3.12)$$

Передаточна функція [18]:

$$A(f) = \frac{-\frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \cdot C \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{1 + \frac{2 \cdot R_1 \cdot R_3 \cdot C}{R_1 + R_3} \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f + \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \cdot C^2 (j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)^2}. \quad (3.13)$$

Резонансна частота [18]:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}}. \quad (3.14)$$



Зміщення фаз [18]:

$$\phi = \arctg \left( \frac{\operatorname{Im}(A(f_r))}{\operatorname{Re}(A(f_r))} \right), \quad (3.15)$$

де  $\operatorname{Im}(A(f_r))$  – умовна частина;

$\operatorname{Re}(A(f_r))$  – дійсна частина.

Через те, що були вибрані номінальні значення, резонансна частота зміниться, необхідно перерахувати значення.

Відносна похибка, обумовлена впливом неточності елементів:

$$\delta_1 = \sqrt{\left( \frac{|A_r - A(f_r)_{R1}|}{A_r} \right)^2 + \left( \frac{|A_r - A(f_r)_{R2}|}{A_r} \right)^2 + \left( \frac{|A_r - A(f_r)_{R3}|}{A_r} \right)^2 + \left( \frac{|A_r - A(f_r)_C|}{A_r} \right)^2} \quad (3.16)$$

де  $A(f_r)_{R1}$  – значення коефіцієнта підсилення для похибки  $R_1$ ;

$A(f_r)_{R2}$  – значення коефіцієнта підсилення для похибки  $R_2$ ;

$A(f_r)_{R3}$  – значення коефіцієнта підсилення для похибки  $R_3$ ;

$A(f_r)_C$  – значення коефіцієнта підсилення для похибки  $C$ .

Відносна похибка, обумовлена впливом температури:

$$\delta_2 = \sqrt{\left( \frac{|A_r - A(f_r)_{R1}|}{A_r} \right)^2 + \left( \frac{|A_r - A(f_r)_{R2}|}{A_r} \right)^2 + \left( \frac{|A_r - A(f_r)_{R3}|}{A_r} \right)^2 + \left( \frac{|A_r - A(f_r)_C|}{A_r} \right)^2} \quad (3.17)$$

де  $A(f_r)_{R1}$  – значення коефіцієнта підсилення для похибки  $R_1$ ;

$A(f_r)_{R2}$  – значення коефіцієнта підсилення для похибки  $R_2$ ;

$A(f_r)_{R_3}$  – значення коефіцієнта підсилення для похибки  $R_3$ ;

$A(f_r)_C$  – значення коефіцієнта підсилення для похибки  $C$ .

Абсолютна похибка від зміни опору:

$$\Delta R = T K C \cdot R_H \cdot \Delta T, \quad (3.18)$$

де  $R_H$  – значення опору при нормальних умовах;

$\Delta T$  – різниця температур.



де  $T_{max}$  – значення температури, яка максимально відрізняється від нормальних умов;

$T_H$  – значення температури при нормальних умовах.

Абсолютна похибка від зміни опору:

$$\Delta C = T K E \cdot C_H \cdot \Delta T, \quad (3.19)$$

де  $C_H$  – значення ємності при нормальних умовах;

Похибка від різниці вхідних струмів:

$$U_{вих1} = \Delta i \cdot \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}. \quad (3.20)$$

Похибка від напруги зміщення від ОУ1:

$$U_{вих2} = U_{см} \left( 1 + \frac{R_2}{2 \cdot R_1} \right). \quad (3.21)$$

Коригування напруги зсуву і напруги від різниці вхідних струмів проводиться шляхом введення поправки в отриманий на виході всіх схем результат.

### 3.3.1.6 Аналіз елементів фазового фільтра

Потрібно поставити діапазон зміни фазового зсуву між сигналом з виходу фазового фільтра і генератора змінної напруги, для цього використовуємо критерій: співвідношення між нелінійністю функції перетворення фазового фільтра і шириною діапазону зміни фазового зсуву повинно бути оптимальним. Так як потрібно визначити значення конденсатора і додаткового опору для забезпечення заданого діапазону, то для спрощення розрахунків потрібно задатися значенням ємності конденсатора  $C$ , початковим значенням діапазону. Вирішуючи систему рівнянь:

$$\begin{cases} -2 \cdot \arctg(f \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_\partial + R_\kappa) \cdot C) = \psi_{\max}; \\ -2 \cdot \arctg(f \cdot 2 \cdot \pi \cdot (R_\partial + R_\kappa + 10^7) \cdot C) = \psi_{\min}. \end{cases} \quad (3.22)$$

Отримаємо другу границю зміни значення фази  $\psi_{\min}^0$ , значення додаткового опору.

Абсолютна похибка, обумовлена впливом неточності резистора  $R_\partial$  визначається:

$$\Delta_{1\max}(R) = |\Delta_{1\max}(R)| = \left( \frac{\partial \varphi(R)}{\partial R_\partial} \right) \cdot |\Delta R_\partial|. \quad (3.23)$$

де  $\Delta R_\partial$  – похибка опору, викликана неточністю виготовлення, Ом.

Для визначення максимального значення похибки необхідно розрахувати її для меж вимірювання  $R$ .

Відносна похибка:

$$\delta_3 = \frac{\Delta_{l\max}(R)}{\varphi_\phi(R)}; \quad (3.23)$$

Відносна похибка, обумовлена впливом температури:

$$\delta_4 = \frac{\Delta_{l\max}(R)}{\varphi_\phi(R)}; \quad (3.24)$$

При цьому  $\Delta R_d$  прийме значення абсолютної похибки зміни опору  $R_d$  від дії температури:

$$\Delta R_d = TKS \cdot R_d \cdot \Delta T, \quad (3.25)$$

де  $R_d$  – значення ємності при нормальних умовах;

$\Delta T$  – різниця температур;

$TKS$  – температурний коефіцієнт опору.

Вихідна напруга, обумовлена різницею вхідних струмів:

$$U_{вих1} = \Delta i \cdot R_2. \quad (3.26)$$

Вихідна напруга, обумовлена напругою зміщення:

$$U_{вих1} = \Delta i \cdot R_2. \quad (3.27)$$

На основі приведених виразів проводиться точний аналіз схеми для визначення відповідності заданим вимогам.

### 3.3.1.7 Аналіз значень елементів перемножувача

Виберемо виконання перемножителя у вигляді ІМС.

Схема включення є стандартною і приведена на рисунку 3.12.

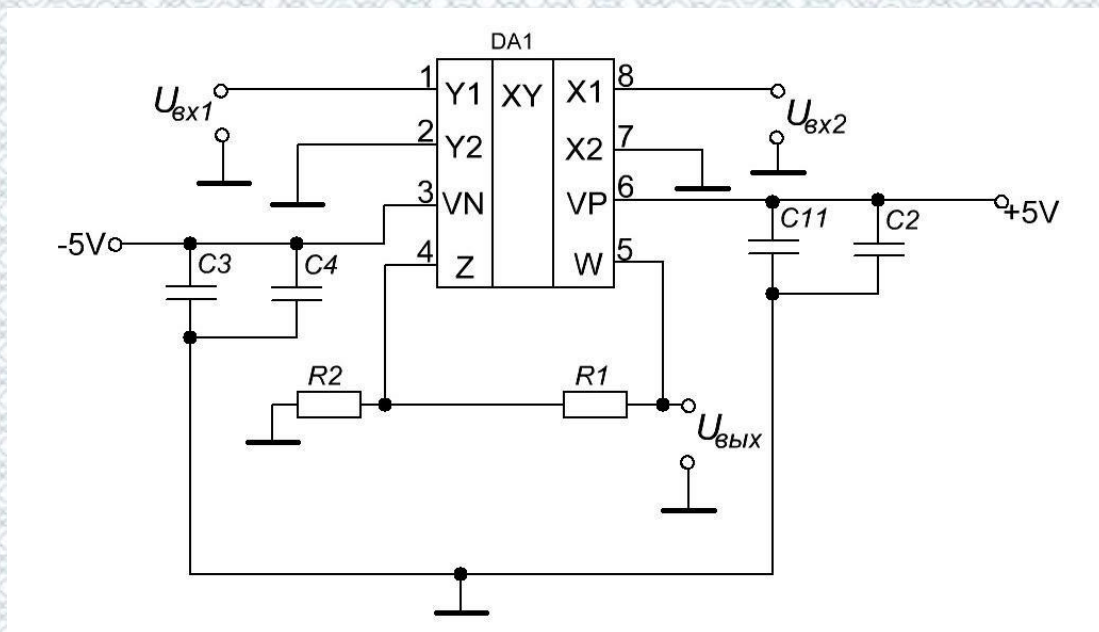


Рисунок 3.12 – Схема включення перемножувача

Він реалізує функцію [18]:

$$U_n = \frac{U_c \cdot U_{on}}{\left(1 - \frac{R_2}{R_2 + R_1}\right) \cdot U} + Z'. \quad (3.28)$$

де  $U=1.05$  [18],

$Z'$  – напруга, що подається на вхід  $Z'$ , вихід  $Z'$  під'єднуємо до землі, тоді  $Z'=0$ ;

$U_c$  – напруга сигналу з полосового фільтра;

$U_{on}$  – напруга з генератора сигналу.

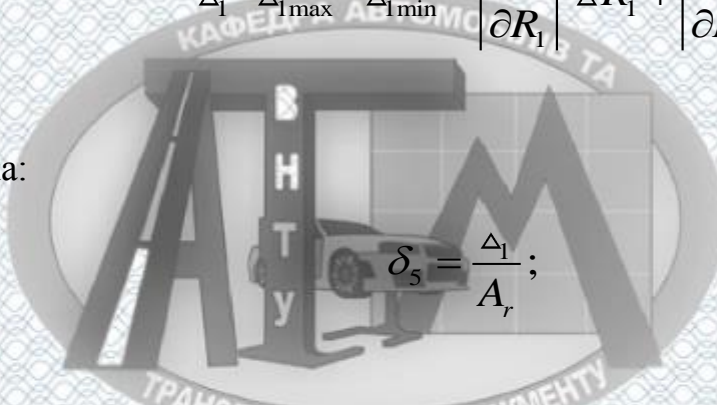
Із 3.28 виразимо  $R_2$ ,  $R_1$  щоб

$$\left(1 - \frac{R_2}{R_2 + R_1}\right) \cdot U = 1, \quad (3.29)$$

Абсолютна похибка, обумовлена впливом неточності елементів:

$$\Delta_1 = \Delta_{1\max} = \Delta_{1\min} = \left| \frac{\partial U}{\partial R_1} \right| \cdot \Delta R_1 + \left| \frac{\partial U}{\partial R_2} \right| \cdot \Delta R_2. \quad (3.29)$$

Відносна похибка:

$$\delta_5 = \frac{\Delta_1}{A_r}; \quad (3.30)$$


Відносна похибка, обумовлена впливом температури:

$$\delta_6 = \frac{\Delta_2}{A_r}; \quad (3.31)$$

де  $\Delta_2$  – абсолютна похибка від зміни опору.

### 3.3.1.8 Сумарна похибка

Похибка АЦП  $\delta_8$  зазначена в його технічній документації.

Сумарна похибка:

$$\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_6^2 + \delta_7^2 + \delta_8^2}. \quad (3.32)$$

Розраховуючи сумарну похибку пристрою і порівнюючи із необхідною робиться висновок про точні характеристики пристрою, якщо отримана похибка більша заданої, то проводиться коригування параметрів пристрою.

### 3.3.2 Експериментальні дослідження працездатності методу вимірювання електричного опору

Для дослідження працездатності принципу дії перетворювача був проведений відповідний експеримент.

На рисунку 3.13 представлена фотографія схеми фазового фільтра.

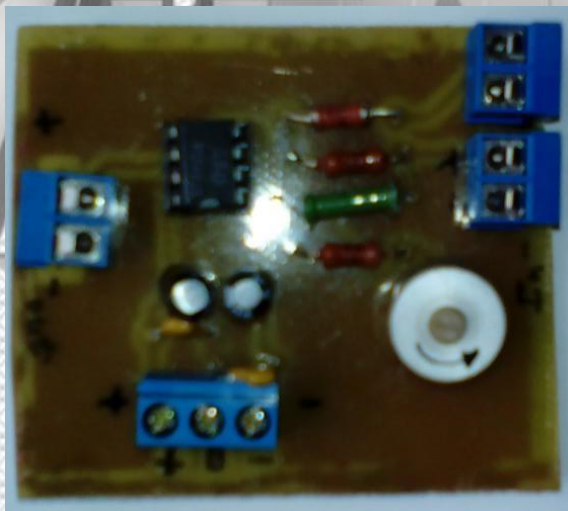


Рисунок 3.13 – Фазовий фільтр

Для отримання градуовальної характеристики на вхід пристрою подавався сигнал опору відомого значення, якому у відповідність було поставлено значення вимірної різниці фаз між опорним сигналом і вихідним сигналом.

Відповідно до схеми на рисунку 3.12:  $R_d=100 \text{ Ом}$ ,  $R=1 \text{ кОм}$ ,  $C=15 \text{ нФ}$ , амплітуда вхідного сигналу  $U_{вх}=200 \text{ мВ}$ , частота вхідного сигналу  $f=4 \text{ МГц}$ .

При обробці отриманих сигналів проводилось їх центрування, для позбавлення від постійної складової:

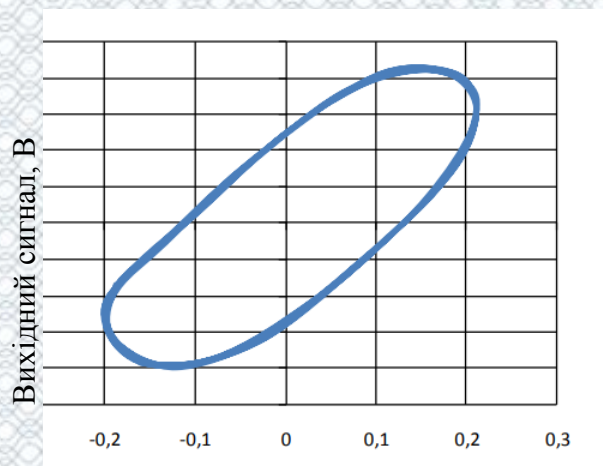
$$\begin{aligned} U_{\text{вих}i} &= U_{\text{вих}i} - Q_{U_{\text{вих}}}, \\ U_{\text{вх}i} &= U_{\text{вх}i} - Q_{U_{\text{вх}}}, \end{aligned} \quad (3.31)$$

де  $Q_{U_{\text{вих}}}$ ,  $Q_{U_{\text{вх}}}$  – середнє арифметичне значення,  
 $i$  – номер елемента вибірки.

Далі, згідно структурній схемі розроблювального пристрою, сигнал з фазового фільтра надходить на смуговий фільтр для виділення сигналу з частотою несучого сигналу, що необхідно для зменшення впливу сигналу ЕРС в зонах тертя, так як побудова градувальної характеристики відбувається з використанням опорів відомих номіналів, і вплив операція цифровий фільтрації на даному етапі не проводиться. Для визначення різниці можна скористатися методом аналізу фігур Ліссажу. Для правильного визначення різниці фаз необхідно враховувати положення великої осі еліпса:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arcsin\left(\frac{a}{b}\right); \text{ велика вісь еліпса в I, III чверті,} \\ \varphi &= \arcsin\left(\frac{a}{b}\right) + 90^\circ; \text{ велика вісь еліпса в II, IV чверті,} \end{aligned}$$

Для підключеного опору в 24 Ом був отриманий графік, отриманий на рисунку 3.14. Різниця фаз складає  $43,5^\circ$ .



Вхідний сигнал, В

Рисунок 3.14 – Фігура Лисажу для 24 Ом



На рисунку 3.15 представлена градуйована характеристика фазового фільтра.

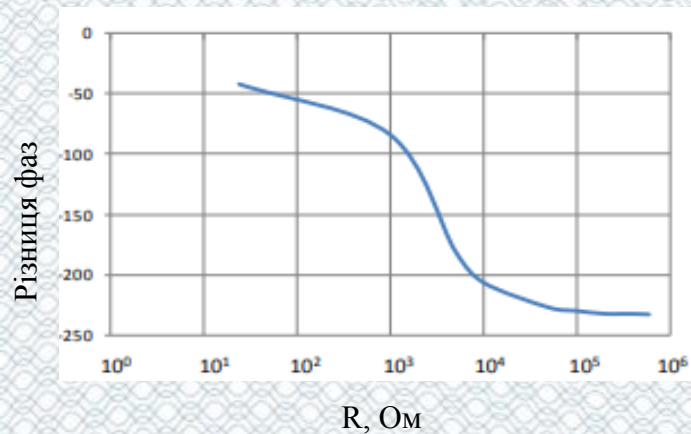


Рисунок 3.15 – Градуированная характеристика

Далі був проведений експеримент по моделюванні сигналу ЕРС. В якості вимірювального опору був підключений резистор 24 Ом, паралельно з ним був включений генератор синусоїдального сигналу з частотою 1 МГц, амплітудою 100 мВ. На рисунку 3.16 показані графіки вхідного і вихідного сигналу без сигналу перешкоди, на рисунку 3.17 – з включеним генератором, імітуючим перешкоди.

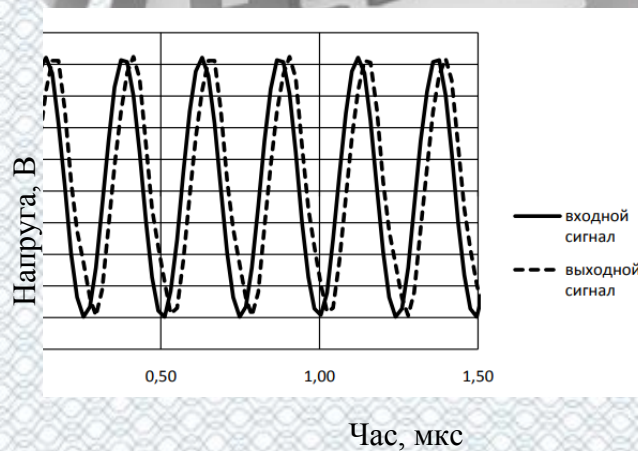


Рисунок 3.16 – Сигнали без перешкод

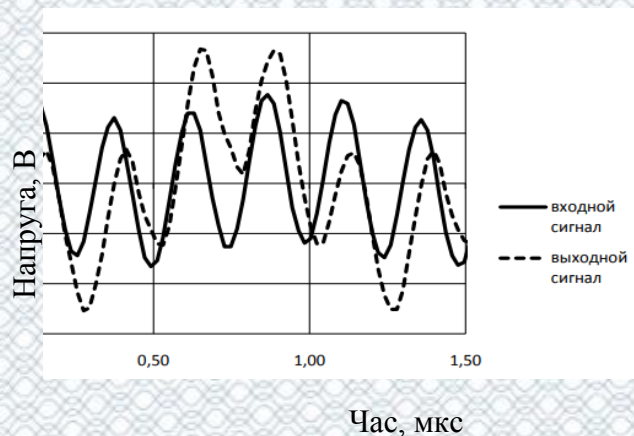


Рисунок 3.17 – Сигнали з перешкодою

Отримана при цьому фігура Лісажу представлена на рисунку 3.18.

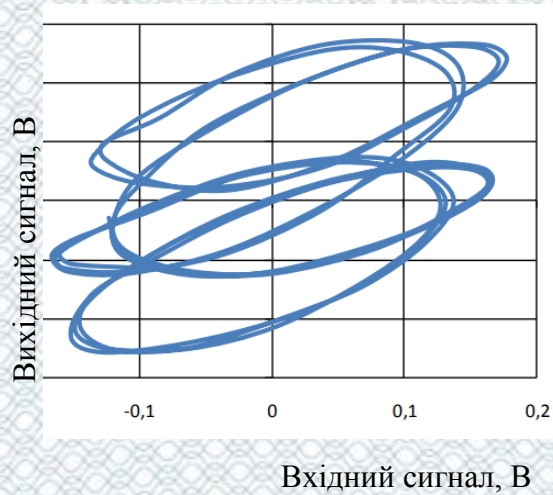


Рисунок 3.18 – Фігура Лісажу для сигналу з перешкодою

Для фільтрації вихідного сигналу фазового фільтра використовувався метод цифрової фільтрації з перетворенням Фурє (рисунок 3.19).

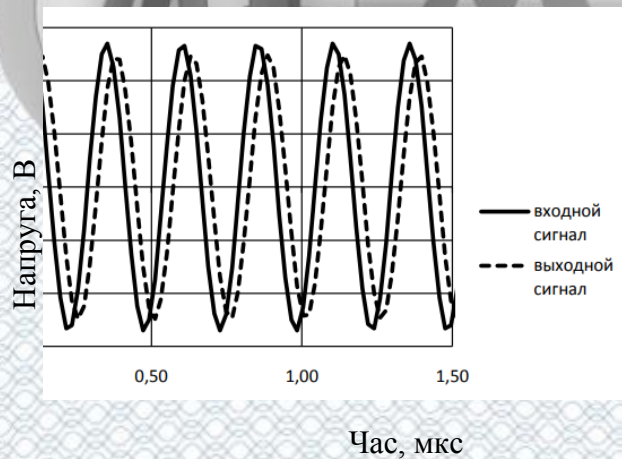


Рисунок 3.19 – Відфільтровані сигнали

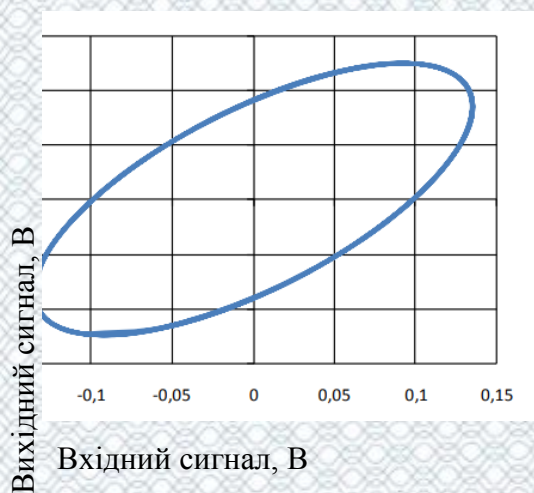


Рисунок 3.20 – Фігура Лісажу сигналів після фільтрації

Виміряна різниця фаз склала  $47,285^\circ$ . Порівнюючи зі значенням, отриманим для сигналу без перешкоди, відносна похибка, склала:

$$\delta = \frac{47,285 - 43,5}{43,5} \cdot 100\% = 8,7\%.$$

В рамках дослідження працездатності методу даний результат можна визнати задовільним, таким чином, використання фазового і смугового фільтрів дозволяє мінімізувати вплив ЕРС в зоні тертя.

### 3.3.3 Дослідження працездатності методу визначення дефектного підшипника

Для перевірки працездатності методу по визначенню підшипника з малим опором був проведений відповідний експеримент, на базі вимірювального стенда Е-250-02 (рисунок 3.21).

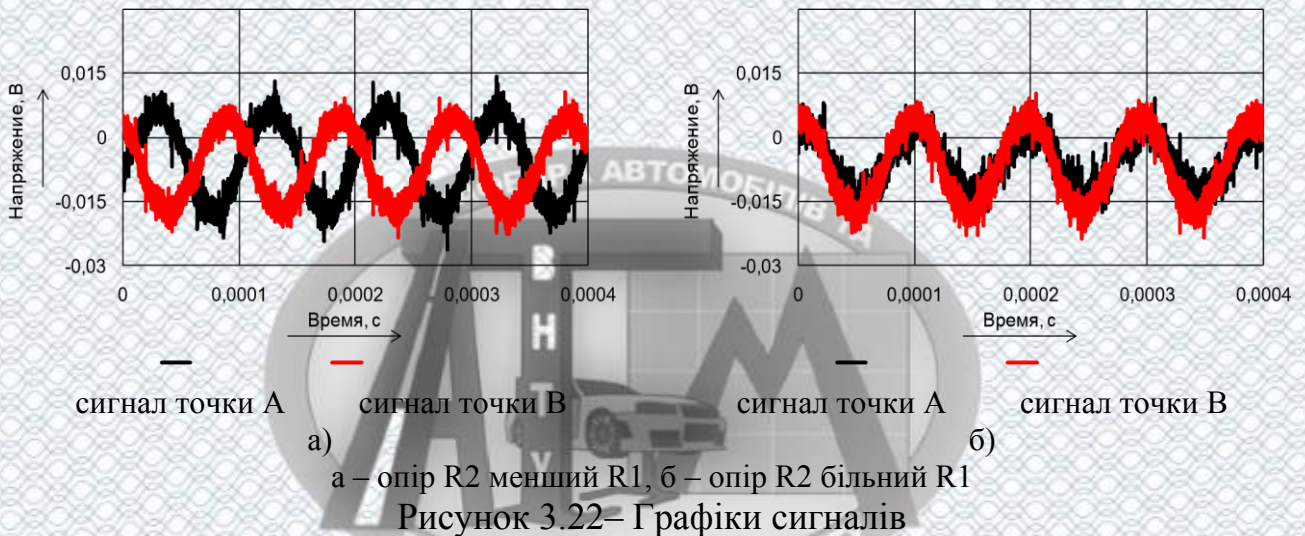


Рисунок 3.21 – Діагностичний стенд

Обладнання, що використовується: генератор сигналу - Г6-43, осцилограф DSO-2090, вимірювальний перетворювач, стенд Е-250-02.

Для подачі синфазних сигналів, різних за знаком використовується підсилювач.

За виразом 3.27 різниці фаз в  $180^\circ$  відповідає випадок, коли  $R_1$  менше  $R_2$ , інакше різниця фаз буде  $0^\circ$ . На рисунку 3.22 показані отримані сигнали.



Відмінність отриманих сигналів від  $180^\circ$  і від  $0^\circ$  обумовлено впливом ФЧХ пристроїв.

### 3.4 Метрологічне забезпечення методу

Вимірювальний прилад, який використовується при вимірах використовує кілька послідовних перетворення для отримання параметра, порівнюючи який з допустимим значенням виноситься судження про стан об'єкта. Діагностичним сигналом є сигнал електричного опору, як первинний перетворювач перетворює в значення різниці фаз, щодо опорного сигналу. Діагностичний параметр НІЧ виходить на основі обробки безлічі миттєвих значень опору, тому, обчислюється чутливість первинного перетворювача.

Чутливість визначається, як відношення приросту вихідного сигналу до збільшення вихідного сигналу який викликав це збільшення:

$$K_r = \frac{dP}{dU}. \quad (3.32)$$

Використовуючи, отриману в ході експериментів, градувальну характеристику первинного перетворювача опір-різницю фаз, отримаємо графік чутливості, представлений на рисунку 3.23.

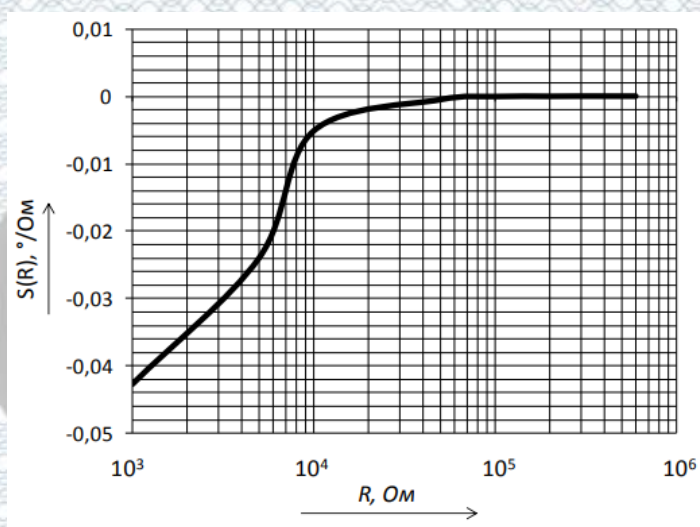


Рисунок 3.23 – Графік чутливості первинного перетворювача пристрою для вимірювання опору

Найбільшу чутливість перетворювач має в діапазоні до 50 кОм. Для електрорезистивної трибодіагностики найбільший інтерес представляють малі значення опору, так як саме вони дозволяють зафіксувати пробій мастильної плівки. У разі роботи в гідродинамічному режимі електричний опір буде величезним і точні його вимірювання не є необхідними. Однозначність діагностичного параметра характеризує відсутність екстремуму на всьому діапазоні вимірювань. Інформативність діагностичного параметра показує достовірність рішення за результатами контролю параметра. Визначається за ступенем перекриття графіків щільності розподілу параметра відповідно справного і несправного стану:

$$I = \frac{|\bar{Q}_{R1} - \bar{Q}_{R2}|}{\sigma_1 + \sigma_2}. \quad (3.33)$$

де  $Q_{R1}$ ,  $Q_{R2}$  – середнє значення діагностичного параметра несправного і справного об'єкта відповідно;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – СКО параметр несправного і справного об'єкта відповідно.

Використовуючи дані, отримані в ході експерименту, по вимірюванню діагностичних сигналів при різних умовах роботи, були отримані значення інформативності сигналів. Були взяті дані для підшипників, що працювали на частоті 900 об-1, справного стану які працювали в умовах рідинного тертя. Несправний підшипник - його контактуючі поверхні були піддані обробці абразивом для зміни параметрів шорсткості, після чого він працював при тих же умовах, що і справний підшипник. Для електричного опору:  $Q_{R1}=138.2 \text{ Ом}$ ,  $\sigma_1=85.1 \text{ Ом}$ ,  $Q_{R2}= 168,3 \text{ кОм}$ ,  $\sigma_2= 127,8 \text{ кОм}$ ,  $I_R=1.314$ . Для віброприскорення:  $Q_{a1}=0,919 \text{ м/с}^2$ ,  $\sigma_1=0,181 \text{ м/с}^2$ ,  $Q_{a2}= 0,177 \text{ м/с}^2$ ,  $\sigma_2= 0.094 \text{ м/с}^2$ ,  $I_a=2.698$ .

Показник інформативності сигналу опору нижчий, ніж у сигналу віброприскорення, що говорить про більшу інформативність. На рисунках 3.24, 3.25 показані гістограми розподілу значень сигналів.

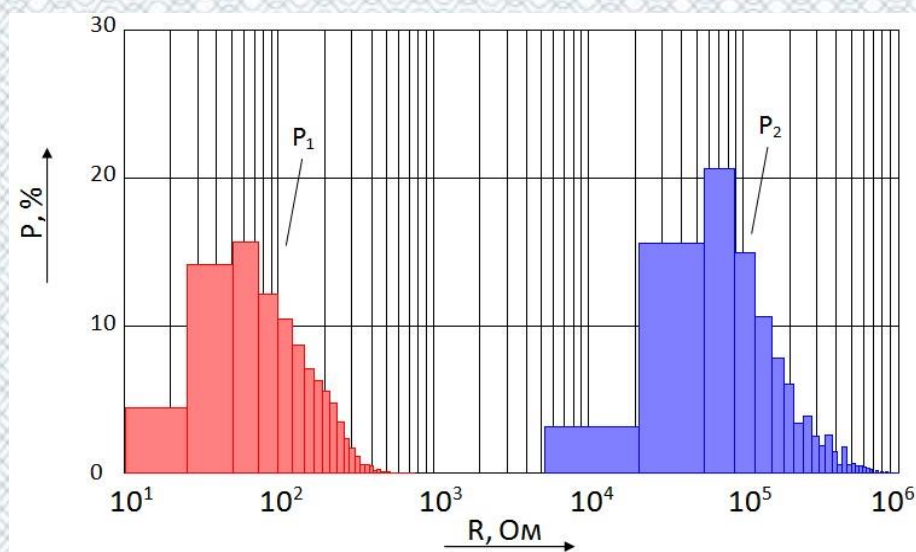


Рисунок 3.24 – Гістограми, апроксимуючі щільність розподілення сигналів опору дефектного ( $P_1$ ) і справного підшипників ( $P_2$ )

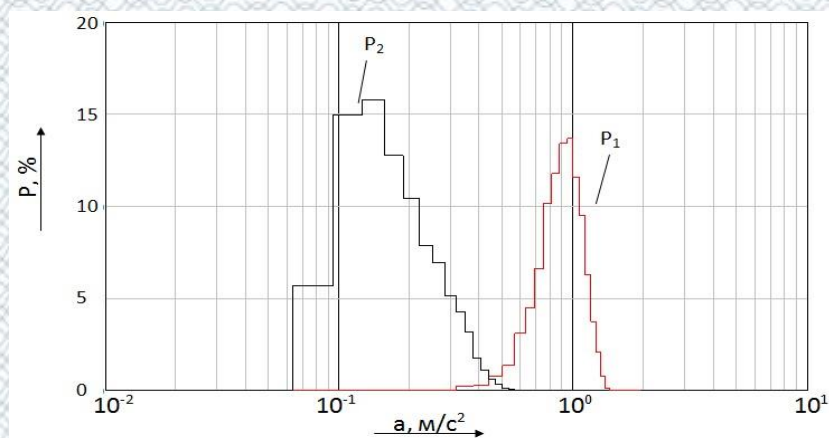


Рисунок 3.25 – Гістограми, апроксимуючі щільність розподілення сигналів віброприскорення дефектного ( $P_1$ ) і справного підшипників ( $P_2$ )

### 3.5 Параметри проведення діагностування

На основі проведених експериментів та результатів розробки технічних засобів були сформовані вимоги, до проведення, на прикладі генератора Г-288е, зазначені в таблиці 3.2, 3.3.

Таблиця 3.2 – Режими діагностування

Назва технічної характеристики	Відомості про характеристику
1	2
Тип генератора	автомобільний генератор змінного струму з двохопорним підшипниковим вузлом
Частота обертання, об-1	1180, 1900, 8000
Радіальне навантаження, Н	10
Місце прикладення навантаження	шків
Підведена напруга, мВ	не більше 100
Діапазон вимірювання НІЧ	від 0 до 1
Час (Твим) вимірювання діагностичних параметрів, с	0,01; 0,1; 1; 10
Поріг спрацювання по опорі ( $R_{пор}$ ), Ом	100*10
Мінімальна продовженість врахованих імпульсів мікроконтакт., мкс, не більше	1
Вивід даних на персональний комп'ютер	COM, USB
Режими вимірювання:	автоматичний; ручний запуск
Вид живлення:	автономне; мережеве
Параметри мережевого живлення: напруга, В частота, Гц	220 +- 22 50 +- 1

Таблиця 3.3 – Нормативні значення

	Значення параметра ПІЧ		
	$1 < K < 0,969$	$0,969 < K < 1,016 \cdot 10^{-3}$	$1,016 \cdot 10^{-3} < K$
Режим тертя	граничний	напіврідинний	рідинний
Технічний стан	максимальний	несправний	справний

### 3.6 Висновки до розділу 3

1 Під час проведеної роботи був розроблений метод і засоби діагностування підшипникового вузла електрогенератора автомобіля.

2 Отримувані сигнали являють собою сукупність детермінованої і випадкової складової, яка визначається зміною стану параметрів підшипників кочення - радіальне навантаження, частота обертання, шорсткість робочих поверхонь, обсяг мастильного шару. Детермінована складова обумовлена макровідхиленнями доріжок кочення, геометричними параметрами, дефектами робочих поверхонь. У сигналі можуть бути присутніми випадкові складові викликані порушенням контактних з'єднань.

3 Розроблені алгоритми дозволяють визначити оцінку технічного стану двохопорного підшипникового вузла за критерієм режиму тертя.

4. Метрологічні характеристики методу визначаються точністю вимірювальних пристроїв, дозволяють проводити вимірювання електричного опору з відносною похибкою 3,1%, що менша ніж у відомого зразка з похибкою 6%, а також визначити дефектний підшипник в вузлі з відносною похибкою 14,8%, коефіцієнт ослаблення паразитного ЕРС  $k_o = 1/867$ .

6. Діагностичний сигнал є інформативним і дозволяє отримати достовірний результат, інформативність електрорезистивного методу  $I_R = 1.314$  вище, ніж вібродіагностичного методу  $I_a = 2.698$ .

7. Контролепридатність електрорезистивного методу діагностування  $K_{KR} = 0.32$  вища, ніж у вібродіагностичного  $K_{KA} = 0,51$ .

8. Сформульовано режими діагностування та нормативні значення діагностичного параметра.



## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **4.1 Аналіз умов праці**

В даній роботі розглядаються умови праці при виконанні роботи. До обладнання для роботи входять робочі столи та обчислювальна техніка.

В приміщенні проводять наукові роботи, різного роду розробки, розрахунки, виконують креслення та інше.

Для притоку свіжого повітря використовується природна вентиляція.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори поділяються за природою дії на фізичні, хімічні, психофізіологічні та біологічні.

В приміщенні на працівників діють тільки дві групи небезпечних та шкідливих виробничих факторів - фізичні та психофізіологічні.

До групи фізичних небезпечних факторів відносять такі підгрупи небезпечної дії: підвищена чи понижена вологість повітря, підвищена чи понижена температура повітря, недостатність природного освітлення, недостатність освітлення робочого місця.

Групу психофізіологічних небезпечних і шкідливих виробничих факторів по характеру дії поділяють на такі підгрупи: фізичні та нервово -психічні перевантаження. До фізичних перевантажень відносять -статичне; до нервово-психічних - монотонність праці, розумові та емоційні навантаження.

### **4.2 Організаційно-технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії**

Визначається як система організаційних, технічних засобів, які запобігають або зменшують дію на робітників шкідливих факторів.

#### **4.2.1 Санітарні вимоги до приміщення**

По санітарним нормам на одного працюючого повинно припадати не

менше  $S=6 \text{ м}^2$  виробничої площі та  $V=15 \text{ м}^3$  об'єму, при кількості персоналу до 20 чоловік.

Без врахування обладнання в нашій аудиторії на одну людину припадає  $S=5 \text{ м}^2$  та  $V=14 \text{ м}^3$ , без врахування обладнання,

Враховуючи площу обладнання, одержимо  $S=4,4 \text{ м}^2$  та  $V=12,8 \text{ м}^3$

#### 4.2.2 Мікроклімат

Категорія робіт в даній зоні: легка 1б. До даної категорії відноситься робота, що виконується сидячи і не потребує переміщення.

Інтенсивність теплового випромінювання працівників від нагрітих поверхонь технологічного обладнання, освітлювальних пристроїв на постійних робочих місцях не повинна перевищувати  $100 \text{ Вт/м}^2$  при опроміненні 25% поверхні тіла.

В приміщенні повинні підтримуватись оптимальні параметри мікроклімату. Так як робота пов'язана з нервово-емоційною напругою.

#### 4.2.3 Вентиляція

Для очищення повітря в приміщенні застосовується природна вентиляційна система.

При природній вентиляції повітрообмін проходить внаслідок різниці температур повітря в приміщенні і зовні, а також в результаті дії повітря. В якості природної вентиляції використовуємо неорганізовану вентиляцію при якій попадання або видалення повітря проходить через нещільності і пори зовнішніх огорожень, через вікна.

#### 4.2.4 Освітлення

Освітлення здійснюється природнім та штучним освітленням. Коефіцієнт освітленості нормується з врахуванням найменшого розміру об'єкта розрізнення, характеристики зорової роботи, системи освітлення фону і контрасту об'єкта з

фоном. Значення коефіцієнта сонячного освітлення наведено в табл. 4.1, параметри штучного та природного освітлення відповідно до ДСТУ EN 12464-1:2016 наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.1 - Вибір коефіцієнта сонячності клімату

Пояс клімату	Коефіцієнт сонячності клімату		
	При світлових проймах, що орієнтуються по сторонах горизонту (азимут, град)		
	136-225	226-315, 46-135	316-45
IV 50 с.ш. і південніше	0,7	0,75	0,95

Таблиця 4.2 - Параметри штучного та природного освітлення

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір розрізн об'єкта, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізно з фоном	Характеристика фона	Штучне освітлення		Природне освітлення		Суміщене освітлення	
						Освітленість, лк		КЕОен III %		КЕОен III %	
						При комбінованому освітненні	При верхньому освітненні	При верхньому	При боковому	При верхньому	При боковому
Високі точності	0,3-0,5	III	б	середній	малий	1000	300	5	2	2,3	0,7-1,2

Коефіцієнт природної освітленості

$$e_{IV} = e_{III} \cdot m \cdot c = 1,9 \cdot 0,9 \cdot 0,75 = 0,35. \quad (4.1)$$

Таким чином діюче значення освітленості лежить нижче нормативного. Тому проведемо розрахунок загального освітлення.

#### 4.2.5 Шум

Походження шумів у даному приміщенні пов'язано з роботами у прилеглих приміщеннях.

Дані в таблиці 4.3 відповідають виду трудової діяльності, що потребує сконцентрованості над виконанням всіх видів робіт на постійних робочих місцях.

Таблиця 4.3 - Рівні звукового тиску

Рівні звукового тиску									Еквівалентні рівні звуку в дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
93	76	70	63	59	54	51	50	40	60

Методи і засоби боротьби з шумом:

Для захисту від шуму у приміщенні аудиторії, який виникає від неякісної роботи оргтехніки слід застосувати столи з спеціальним відділенням для встановлення системних блоків.

Зниження шуму на шляху його розповсюдження в значній мірі досягається проведенням будівельних акустичних заходів з застосуванням звукоізолюючих перегородок між приміщеннями.

#### 4.2.6 Вібрації

При роботі працюючий може піддаватися дії вібрації. Загальна вібрація викликає струс всього організму, місцева - окремі частини тіла. Працюючий відповідно до ДСН 3.3.6.039-99 може піддаватися одночасно впливу загальної і локальної вібрації (“комбінована вібрація”).

Характеристики вібрації, що діють на дільниці, наведено в табл. 4.4 – 4.5.

Таблиця 4.4 - Категорія вібрацій

Категорія вібрації по санітарним нормам критерій оцінки	Характеристика умов праці	Приклад джерел вібрацій
Тип «а» Границя зниження рівня виробничої праці	Технологічна вібрація діє на операторів стаціонарних машин і обладнання або на робочі місця від інших джерел вібрації	Верстати, електричні машини, насосні агрегати, вентилятори

Таблиця 4.5 - Характеристики вібрацій

Вид вібрації	Категорія вібрації	Напрямок дії	Нормативне коректування по частоті і еквівалентне коректування значень			
			Віброприскорення		Віброшвидкість	
			м/с <sup>2</sup> ·10 <sup>-2</sup>	дБ	м/с <sup>2</sup> ·10 <sup>-2</sup>	дБ
Локальна	—	Хл,Ул,Зл	2,0	126	2,0	112
Загальна	3 тип “а”	Z0.Y0.X0	0,1	100	0,2	92

Основні заходи щодо захисту людини від шкідливої дії вібрації у виробничих умовах можна бути поділити на технічні, організаційні і лікувально-профілактичні, а також колективні та індивідуальні. До технічних заходів належать: - зниження вібрації в джерелі її виникнення (вибір на стадії проектування кінематичних і технологічних схем, які знижують динамічні навантаження в устаткуванні та ін.); - зниження діючої вібрації на шляху розповсюдження від джерела виникнення (вібропоглинання, віброгасіння, віброізоляція). До організаційних заходів належать: - організаційно-технічні (своєчасний ремонт та обслуговування обладнання за технологічним регламентом, контроль допустимих рівнів вібрації, дистанційне керування вібронебезпечним обладнанням); - організаційно-режимні (забезпечення відповідного режиму праці та відпочинку, заборону залучення до вібраційних робіт осіб молодших 18 років, тощо); До лікувально-профілактичних заходів належать: - періодичні медичні огляди; - лікувальні процедури (фізіологічні процедури, вітамінно- та фітотерапія).

### 4.3 Пожежна безпека

За ступенем вогнестійкості приміщення відноситься до I ступені - приміщення з несучими і огорожуючими конструкціями з природних чи штучних матеріалів, бетону, залізобетону з використанням листових чи плитних перегороджуючих матеріалів.

Пожежі на підприємствах являють собою велику небезпеку для працюючих і можуть спричинити велику матеріальну шкоду. Можливими

причинами виникнення пожеж можуть бути: порушення технологічного режиму, несправність системи опалення і вентиляції, несправність електрообладнання, несправність запираючої арматури, самозапалення матеріалів, схильних до горіння. Усі виробництва поділяються на декілька категорій по пожежній вибуховій і вибуховопожежної безпеки. Приміщення відноситься до категорії Д - негорючі речовини і матеріали в холодному стані, визначення категорії приміщення занесено до таблиці 4.6

Таблиця 4.6 - Визначення категорії приміщення

Категорія приміщення	Допустима кількість поверхів	Ступінь вогнестійкості	Площа поверхів в межах пожежного відділення, м <sup>2</sup>
Д	6	1	не обмежується

#### 4.3.1 Визначення категорії приміщення.

При проектуванні приміщень передбачаємо безпечну евакуацію людей на випадок виникнення пожежі: висота від підлоги донизу виступаючих конструкцій перекриття повинна бути не менше 2,2 (м); висота від підлоги донизу виступаючих частин комунікацій і обладнання в місцях регулярного надходження людей і на шляхах евакуацій не менше 2(м).

Кількість евакуаційних виходів не повинна складати менше двох з кожного поверху. Евакуаційні виходи повинні розташовуватись окремо. Кількість людей на 1(м) евакуаційного виходу (дверей) для приміщень I ступені вогнестійкості категорії Д - 260 чоловік. Відповідно до таблиці визначаємо відстань по коридорам до виходу і розміщення виходів. У таблиці 4.7 вказані значення відстані до виходу.

Таблиця 4.7 – Значення відстані до виходу

Розміщення виходів	Категорія приміщення	Ступінь вогнестійкості	Відстань по коридорам до виходу, м
Між двома зовнішніми виходами	Д	1	Більше/120

Для запобігання необхідно провести ряд заходів по ПБ:

- установити пожежні сповісники;
- навчити робітників елементарним правилам вогнегасіння;
- проводити своєчасні профілактичні огляди обладнання;
- підвести аварійне водопостачання.

#### **4.4 Техніка безпеки**

До роботи повинний допускатися обслуговуючий персонал, що добре знає вимоги до роботи техніки, електроживлення, а також особливості його застосування.

Вентиляція, що відсмоктує, повинна бути забезпечена пиловловлюючим фільтром. Необхідно стежити за своєчасним очищенням пиловловлюючого фільтра. Додаткові заходи безпеки при роботі з конкретними матеріалами повинні бути зазначені у відповідних технологічних інструкціях.

Кожен споживач зобов'язаний (у залежності від конкретних умов) розробити свою інструкцію з техніки безпеки.

##### **4.4.1 Електробезпека**

В даному приміщенні наявні такі небезпечні фактори:

- а) наявність електричних розеток;
- б) наявність освітлювальних пристроїв;
- в) наявність оргтехніки.

Виходячи з перелічених факторів вибираємо спосіб захисту - занулення.

Вимоги до електрообладнання:

Обладнання занулене, що забезпечує захист від ураження електричним струмом. Відповідністю з ПУЕ занулення застосовується і являється ефективною мірою захисту електрообладнання.

## 4.5 Безпека в надзвичайних ситуаціях

### 4.5.1 Дія іонізуючих випромінювань на людей

Усі джерела радіоактивного випромінювання становлять так званий природний радіаційний фон. При вивченні дії випромінювання на організм людини встановлено такі особливості:

- навіть незначна кількість поглиненої енергії випромінювання спричинює глибокі біологічні зміни в організмі;
- наявність прихованого (інкубаційного) періоду дії іонізуючого випромінювання;
- випромінювання має генетичний ефект;
- органи живого організму мають різну чутливість до випромінювання;
- окремі організми неоднаково реагують на опромінювання;
- опромінювання залежить від частоти, одноразове опромінювання у великій дозі спричинює більш глибокі зміни.

Радіоактивні речовини потрапляють в організм людини при вдиханні зараженого повітря, із зараженою їжею чи водою, крізь шкіру, відкриті рани. Проникненню радіоактивних забруднень крізь шкіру і рани можна запобігти, дотримуючись певних заходів захисту.

Основним джерелом опромінювання людини є радіоактивні речовини, які потрапляють з їжею. Ступінь небезпеки забруднення радіонуклідами залежить від частоти вживання забруднених радіоактивними речовинами продуктів, а також від швидкості виведення їх з організму. Деякі речовини харчових продуктів (пектинові, барвники) утворюють нерозчинні сполуки зі стронцієм, кобальтом, свинцем, кальцієм та іншими важкими металами, які не перетравлюються і виводяться з організму. Отже, ці речовини виконують радіозахисну функцію. Тому пектин, а також пектиномісткі продукти (чорна смородина, агрус, полуниці та ін.), використовують у спеціальному харчуванні для виведення радіоактивних елементів з організму.



Первинним процесом дії радіоактивних речовин в організмі людини є іонізація. Збуджена при цьому енергія іонізуючого опромінювання передається на різні речовини організму людини. У разі дії на прості речовини (гази, метали та ін.) будь-яких змін фізико-хімічної природи у них не спостерігається. При дії на складні речовини, молекули яких складаються з багатьох різних атомів, вони розпадаються (дисоціація). Це так звана пряма дія на прості або складні речовини організму людини. Більш суттєву роль відіграє механізм непрямой дії іонізуючого випромінювання, під яким треба розуміти радіаційно-хімічні зміни у певній розчинній речовині, зумовлені продуктами радіолізу (розпаду) води.

Для захисту працівників об'єкта господарювання в таких умовах роботи також необхідно вжити додаткові заходи, такі як:

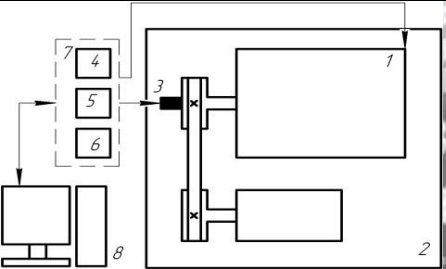
- евакуація працівників, що не зайняті на виробництві;
- укриття в сховищі незайнятої зміни;
- надання працівникам засобів індивідуального захисту;
- систематичне проведення прибирання у виробничих приміщеннях;
- герметизація виробничого приміщення і обладнання вентиляційної системи фільтрами;
- здійснення йодної та медикаментозної профілактики персоналу;
- обмеження перебування працівників на відкритій місцевості.

## РОЗДІЛ 5. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ МЕТОДИКИ ДІАГНОСТУВАННЯ

### 5.1 Технологія діагностування

Для впровадження в виробничий процес була розроблена технологічна карта діагностування підшипникового вузла електрогенератора, таблиця 5.1.

Таблиця 5.1 - Типова технологічна карта

				Пункт технічного огляду
		Максимальна загальна трудомісткість 1,07. Мінімальна загальна трудомісткість 0,33.		контролер (ліцензійний)
№ пун	Зміст операції	Прилади і інструмент	Технічні умови	Трудомісткість люд.год.
1	Встановити генератор 1 на стэнд	Ключ гайковий		0,05
2	Перевірка електричної ізоляції генератора	Тестер	Перевірка електричної ізоляції генератора від стэнду	0,01
3	Підєднати через струмозіймник 3 АЦП установки до генератора 1	DSO-2090	Вимірний рівень шумів не повинен перевищувати 1,5% від межі вимірювання	0,01
4	Підєднати блок вимірювання електричного опору 5	Вимірювальна установка		0,01
5	Провести N серій вимірювань	Спрощена програма	Перевірити наявність помилок	0,1
6	Виміряти N значень НІЧ	Управляюча програма	Перевірити наявність помилок	0,1
7	Визначити середнє значення	Управляюча програма	НІЧ не повинен перевищувати допустимого значення	0,01
7.1	Умова п.7 виконується, провести демонтаж генератора	Ключ гайковий		0,04
8	Підєднати блок визначення дефектного підшипника 6	Вимірювальна установка		0,1
9	Провести N серій вимірювань	Управляюча програма	Перевірити наявність похибок	0,1
10	Аналіз даних	Управляюча програма	Різниця фаз 0 - $R1 > R2$ , підшипник R2 дефектний	0,01
11	Зняти генератор 1 з стэнду 2	Ключ гайковий		0,04
12	Провести заміну підшипника	Слюсарний інструмент, ключі гайкові		0,2
13	Повторити процедуру діагностування	Вимірювальна установка, стэнд	НІЧ задовільняє заданим умовам	0,33

Етапи діагностування:

- 1) установка і перевірка дотримання умов діагностування;
- 2) отримання сигналу опору і аналіз даних, в разі необхідності перейти до етапу визначення дефектного підшипника;
- 3) провести визначення дефектного підшипника, його заміну.
- 4) проведення повторного діагностування технічного стану, якщо контрольований параметр задовільняє заданому значенню, то діагностування завершено, інакше продовжити процедуру діагностування.

Час, необхідний для діагностування, відрізняється в залежності від необхідності проведення процедури визначення дефектного підшипника і повторної процедури діагностування, найбільший внесок вносить процедура установки і демонтажу генератора зі стану, операційний час може бути скорочено за рахунок використання спеціального оснащення.

Для випадку, коли вартість підшипників є незначною, то процедура визначення дефектного підшипника не проводиться, для підвищення надійності заміні підлягають обидва підшипника, щоб знос був рівномірний.

## 5.2 Розрахунок економічного ефекту

На вартість діагностичного обладнання впливають різні чинники, в тому числі дослідницька діяльність, спрямована на огляд існуючих методів, синтез структурної і принципової схеми пристрою, технології його виготовлення, перевірка відповідності вимогам до безпеки життєдіяльності, економічний розрахунок.

Економічні показники наведені в таблицях 5.2-5.4

Таблиця 5.2 – Покупні комплектуючі вироби

Найменування	Кількість, шт	Ціна, грн.	Сума, грн.
1	2	3	4
Конденсатори: K71-6 1,3пФ 0,5%	4	25	100
Johanson Manufacturing 9701-0, 0.25 пФ-0.7 пФ	1	600	600

## Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4
Мікросхеми LM108H AD835 УД514	3 1 1	100 150 30	300 150 30
Резистори С5-53В 1,42 МОм 0,5% С5-53В 2,84 МОм0,5% С5-53В 52,3 Ом 0,5% С5-53В, 1 КОм 0,5% С5-53В, 0,732 МОм 0,5% С5-53В 2КОм 0,5%	2 2 2 4 1 2	8 8 8 8 8 8	16 16 16 32 8 16
Готові пристрої DSO-2090 ГЗ-112/1	1 1	12000 2400	12000 2400
Комплектуючі матеріали	–	1650	1650
Інші вироби (10% від загальної вартості)	–	1700,3	1733,4
Всього		18703,3	19067,4

Таблиця 5.3 – Калькуляція собівартості проектного виробу

Статті затрат	Сума, грн
1 Основні матеріали	15684
2 Комплектуючі матеріали	1650
Разом матеріальні затрати:	19067,4
3 Основна (тарифна) заробітня плата виробничих робочих	6204
4 Додаткова заробітня плата	620,4
5 Повна заробітня плата	6824,4
7 Відрахування на соціальні потреби (ВСП)	2047,32
8. Накладні витрати	6204
7. Інші витрати	155,1
Разом: Повна собівартість	34298,22

Таблиця 5.4 – Ціна проектного виробу

Статі витрат	Сума, грн.
1 Повна собівартість	34298,22
2 Повна собівартість без матеріальних затрат	15230,82
3 Норма прибутку	6859,65
4 Відпускна ціна	41157,86

Річні поточні витрати:

$$Г_з = З_{обс} + A + P + E, \quad (5.1)$$

де  $З_{обс}$  – витрати на оплату праці обслуговуючого персоналу з врахуванням відрахувань на соціальні потреби, грн.;

$A$  – витрати на амортизацію обладнання, грн.;

$E$  – витрати на електроенергію,  $E=1000$  грн.;

$P$  – витрати на поточний ремонт і обслуговування.

$Ц_{онт}$  – Відпускна ціна обладнання (з ПДВ),  $Ц_{онт}=40959,86$  грн.;

$B$  – витрати на ремонт і обслуговування обладнання, 10%.



$$P = \frac{Ц_{онт} \cdot B}{100\%}, \quad (5.2)$$

$$P = \frac{41157,86 \cdot 10\%}{100\%} = 4115,79 \text{ грн.}$$

Прийmemo час експлуатації  $t$  рівним 5 років, тоді:

$$A = 41157,86 \cdot \frac{1}{5} = 8231,58 \text{ грн.}$$

Тоді річні поточні витрати:

$$Г_з = 4115,79 + 8231,58 + 1000 = 13347,37 \text{ грн.}$$

Зведемо отримані ключові дані в одну таблицю 5.5.

Таблиця 5.5 - Підсумкова таблиця

Параметр	Значення
Загальна трудомісткість етапів НІЧ	2218 н/год
Вартість закупки компонентів	19067,4 грн.
Витрати на оплату праці	6824,4 грн.
Повна собівартість	34298,22 грн.
Відпускна ціна без ПДВ	41157,86 грн.
Річні поточні витрати	13347,37 грн.

Відомо, що 40 зі 100 відмов викликані проблемами з підшипниками [15], процедура їх перевірки не входить в стандартні послуги автосервісів, їх діагностика проводиться органолептичними способами і не має чіткого критерію, на підставі якого, можна визнати підшипники непридатними, значить несправність невизначена даним методом змусить купити новий виріб, тоді економічний ефект від впровадження може бути розрахований наступним чином:

$$K = C_2 \cdot N \cdot N_{zd} \cdot (p_0 - p_m) \cdot p_n + C_{нч} \cdot N \cdot N_{zd} \cdot (t_u - t_o), \quad (5.3)$$

де  $C_2$  – ціна генератора;

$N$  – число діагностуємих генераторів в рік,  $N=150$ , шт.;

$p_u$  – похибка інструментального методу,  $p_u=0,031$ ;

$p_o$  – похибка органолептичного методу,  $p_o=0,5$ ;

$p_\delta$  – ймовірність відмови генератора із-за підшипника, для легкових автомобілів  $p_\delta=0,07$ ;

$C_{нч}$  – вартість нормо-години роботи оператора,  $C_{нч}=300$  грн.;

$t_o$  – час на проведення діагностування органолептичним методом,  $t_o=0,1$ , год.;

$t_u$  – час на проведення діагностування,  $t_u=0,33$ , год.

Діапазон цін для легкових автомобілів складає від 3668 грн. до 15980 грн., тоді економічний ефект складає  $K \in [12543; 73173]$  грн./рік.

### 5.3 Визначення етапу впровадження методу діагностування

Визначимо доцільний етап виконання операції діагностування підшипникового вузла. Для визначення періодичності проведення діагностування використовуються такі методи, як угруповання по стрижневим операціями ТО, економіко-імовірнісний, техніко-економічний метод. Перший метод заснований на тому, щоб періодичність стрижневих операція була

оптимальною. Другий метод дозволяє визначити доцільність виконання операції з оптимальною періодичністю стрижневою операції.

При третьому методі групова періодичність визначається для мінімізації сумарних витрат на обслуговування. Так як знос підшипників носить поступовий характер, то доцільно проводити діагностування в кінці нормальної експлуатації. Так як діагностування генератора вимагає його демонтаж, що вимагає значних витрат, то доцільно використовувати економіко-імовірнісний метод.

Цільова функція витрат на діагностування генератора, в залежності від періодичності діагностування на тис. км пробігу  $L$  [7]:

$$C(L) = L^{-1} \cdot [B + A \cdot P_a(L) + D \cdot (t_e + t_a \cdot P_a(L))] \rightarrow \min, (5.4)$$

де  $B$  – витрати на одне діагностування,  $B=100$  грн.;

$A$  – витрати на аварійний ремонт генератора,  $A=5500$  грн.;

$D$  – питомий чистий прибуток, принесений автомобілем за 1 рік експлуатації, грн./год,  $D=1000$  грн./год.;

$p_a(L)$  – автомобілі, для яких буде проведений аварійний ремонт на пробізі  $L$ ;

$t_b$  – час на одне діагностування генератора,  $t_b=0,33$  год.;

$t_a$  – час, відведений на аварійний ремонт генератора,  $t_a=3,14$  год.;

$L$  – пробіг автомобіля, тис. км.

Параметр  $p_a(L)$  визначається для цілих  $L$ , використовуючи вираз:

$$P_a(L) = \sum_{n=1}^r P_a(L), (5.5)$$

де  $p_a(L)$  визначається рекурентно по формулам:

$$P_a(1) = Q(1);$$

$$P_a(2) = Q(1) \cdot p_a(1) + Q(2)(1 - Q(1));$$

$$P_a(3) = Q(1) \cdot p_a(2) + Q(2) \cdot p_a(1) \cdot (1 - Q(1)) + Q(3) \cdot (1 - Q(1)) \cdot (1 - Q(2));$$

$$P_a(n) = Q(1) \cdot p_a(n-1) + Q(2) \cdot p_a(n-2) \cdot (1 - Q(1)) + \dots + Q(n-1);$$

$$P_a(1) \cdot (1 - Q(1)) \dots (1 - Q(n-2)) + Q(n) \cdot (1 - Q(1)) \dots (1 - Q(n-1)).$$

де  $Q(L)$  – ймовірність безвідмовної роботи елемента.

Поточна ймовірність безвідмовної роботи:

$$p_l = 1 - n / N_n, \quad (5.6)$$

де  $n$  – число машин, які мають відмови генераторів в заданому інтервалі напрацювання, од;

$N_n$  – число машин контрольної групи, од.;

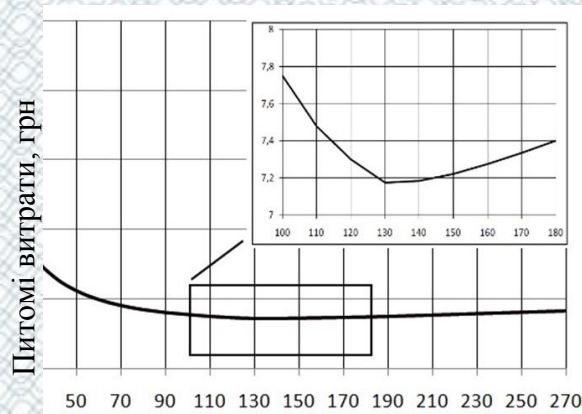
$$n = N_k - N_n, \quad (5.7)$$

де  $N_k$  – число машин, не маючих відмов генераторів в заданому інтервалі напрацювання, од.

По графіку, для виразів (5.6) (рисунок 5.1), визначаємо пробіг, при якому питомі витрати мінімальні, що складають 130 тис. км. Для Volkswagen Passat періодичність ТО-1 складає 8000 км, приводячи у відповідність отримаємо  $L^1_{д} = 128$  тис. км.

Далі визначаємо періодичність повторного діагностування методом допустимої ймовірності безвідмовної роботи. Задамося ймовірністю  $P_{\tau} = 0,95$ .





Напрацювання автомобіля, тис. км

Рисунок 5.1 – Визначення напрацювання на початку діагностування

Число машин, що мають відмова генераторів за період напрацювання на відмову:

$$n = \lambda \cdot \frac{N_{\kappa} + N_{\eta}}{2} \cdot L_{\partial}, \quad (5.8)$$

де  $\lambda$  – параметр потоку відмов в заданому інтервалі часу, од./тис. м;

$L_{\partial}$  – періодичність діагностування, тис. км.

$$L_{\partial} = \frac{2 \cdot (1 - p_{\tau})}{\lambda \cdot (1 + p_{\tau})}. \quad (5.9)$$

Для найбільш відповідальних елементів задається ймовірність  $p_{\tau}=0,95-0,9$ , для інших  $p_{\tau}=0,85-0,9$ .

Для ймовірності  $p_{\tau}=0,95$   $L_{\partial 0,95}=24,4$  тис. км,  $p_{\tau}=0,90$   $L_{\partial 0,9}=47,5$  тис. км,  $p_{\tau}=0,85$   $L_{\partial 0,85}=60,7$  тис. км. Для Volkswagen Passat періодичність ТО-1 складає 8000 км, ТО-2 16000 км, скоректувавши відносно встановленої періодичності:  $L_{\partial 0,95}=32$  тис. км,  $L_{\partial 0,9}=48$  тис. км,  $L_{\partial 0,85}=64$  тис. км.

Таким чином, перше діагностування рекомендується проводити при напрацюванні  $L^1_{\partial}=128$  тис. км., наступні з періодичністю 48 тис. км для ймовірності безвідмовної роботи 0,9.

Також економічно доцільно проводити діагностування підшипникового вузла для випадку його відмови, через вихід з ладу підшипників, після їх заміни, з метою контролю якості складання та мастила підшипникового вузла.

Так як для проведення операції діагностування підшипникового вузла необхідна наявність спеціального обладнання, то виробничими областями застосування є: виробничий контроль підшипникового вузла електрогенератора на підприємстві виробнику електрогенератора; на автотранспортних підприємствах, авторемонтних заводах, фірмах і майстернях, станціях технічного обслуговування.

#### 5.4 Висновки до розділу 5

1. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження процедури діагностування підшипникового вузла, які визначають послідовність дій, розташування вимірювального обладнання, регламентують час операцій.

2. Визначено економічні показники розробленого методу діагностування. Вартість матеріальних витрат 19067,4 грн.; витрати на оплату праці 6824,4 грн.; повна собівартість 34298,22 грн.; відпускна ціна без ПДВ 41157,86 грн.; річні поточні витрати 13347,37 грн.; економічний ефект складає  $K \in [12543; 73173]$  грн./рік.

3. Розроблено практичні рекомендації щодо впровадження процедури діагностування підшипникового вузла, які визначають послідовність дій, розташування вимірювального обладнання, регламентують час операцій. Перше діагностування рекомендується проводити при напрацюванні  $L^1_{д}=128$  тис. км., наступні з періодичністю 48 тис. км для ймовірності безвідмовної роботи 0,9.

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі досягнута поставлена мета, на основі рішення сформульованих завдань підвищення надійності автотранспортних засобів за рахунок поліпшення ефективності діагностування електрогенератора шляхом оцінки режиму тертя в підшипниковому вузлі, виявлення дефектного підшипника по електричному опорі вузла на тлі дії ЕРС в зонах тертя.

Основні результати і висновки магістерської кваліфікаційної роботи:

1. Проведений аналіз проблеми діагностики технічного стану підшипникових вузлів показав, що перспективним є електрорезистивний метод діагностування, а так само показав необхідність розробки методу і засобів діагностування, спрямованих на зменшення впливу ЕРС на результат вимірювання, вдосконалення методів виділення діагностичної інформації в двохопорному підшипниковому вузлі.

2. Для двохопорного підшипникового вузла електрогенератора автомобіля була розроблена математична модель для проведення розрахунків сигналів його електричного опору, в залежності від різних умов роботи, заснована на положеннях теорій пружності, контактної гідродинаміки, електропровідності контакту двох тіл, контакту реальних поверхонь, що відрізняється вразуванням впливу оксидних і адгезійних шарів робочих поверхонь на сигнал електричного опору, можливістю проведення розрахунків для двохопорного підшипникового вузла.

3. Експериментальні дослідження підтвердили, що сигнал опору двохопорного підшипникового вузла буде прагнути до значень сигналу підшипника з гіршим технічним станом; порівняння теоретичних і експериментальних графіків для однакових умов показали, що відмінність в значеннях складає до двох порядків, форми сигналів збігаються, коефіцієнт кореляції становить 0,85, що говорить про правильність положень математичної

моделі і її придатності для аналізу і формування діагностичного параметра, методу діагностування.

4. Розроблено метод і засоби діагностування, та методика діагностування, що включає в себе алгоритми проведення операції діагностування, режими і нормативні значення параметра НІЧ. На основі вимірювання параметра НІЧ здійснювати судження про технічний стан підшипникового вузла, проводити розрахунок його ресурсу.

Похибка пристрою вимірювання сигналу опору становить 3,1%, що менше ніж у відомого зразка з похибкою 6%, пристрої визначення дефектного підшипника - 14,8%, коефіцієнт ослаблення паразитного ЕРС  $k_o = 1/867$ .

5. На основі економічних показників, було визначено економічний ефект який складає  $K \in [12543; 73173]$  грн./рік.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буше Н. А. Основы трибологии: Трение, износ, смазка / Н. А. Буше, Н. Б. Демкин, А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 2001. – 663 с.
2. Виробничо-технічна база підприємств автомобільного транспорту. Навчальний посібник / [В.В. Біліченко, В.Л. Крещенецький, С.О. Романюк, Є.В. Смирнов]. – Вінниця, ВНТУ, 2013. – режим доступу : <http://posibnyky.vntu.edu.ua/newauto/5/index.html>.
3. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною НАПБ Б.03.002-2007. – Київ : ДЕРЖПОЖБЕЗПЕКИ МНС УКРАЇНИ, 2007.
4. Говорущенко Н.Я. Техническая эксплуатация автомобилей / Н.Я. Говорущенко. – Харьков: Вища школа, 1984. – 312 с.
5. Горбунов, А. Г. Электрический контроль режима трения в подшипниках электродвигателей / А. Г. Горбунов // Автоматизация и производство. – 1998. - №1 (14). С. 19-21.
6. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. Для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 4-е изд., доп. – Москва : Высш. Шк., 2006. – 799с.
7. Девятков, В.Д. Прогнозирование ресурса контактно-щёточных узлов капитально отремонтированных генераторов мобильных сельскохозяйственных машин: дисс. канд. техн. наук / В. Д. Девятков. - Челябинск, 2003. - 159 с.
8. Демкин, Н. Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология / Н. Б. Демкин // Трение и износ. – 1995. – Т. 16. – № 6. – С. 1003-1024.
9. Жарков, В. Я. Триботехническое материаловедение: учебное пособие / В. Я. Жарков. – Брянск: БГТУ, 2005. – 159 с.
10. Ковалев, М. П. Расчет высокоточных шарикоподшипников / М. П. Ковалев, Н. З. Народецкий // 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1980. – 373 с.

11. Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин: Учебн. Пособие для машиностр. спец. Вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – Москва : Высш.шк., 1991. – 319 с.
12. Кривошеин, Ю. А. Определение информативных параметров контактирования трибосопряжений / Ю. А. Кривошеин. М. В. Виноградов // Управляющие и вычислительные комплексы в машино- и приборостроении: Межвуз. науч. сб. Саратов. гос. ун-та. – Саратов: Изд-во СГТУ. – 1999. – С. 47-49.
13. Мышкин, Н. К. Контакт шероховатых тел и его проводимость / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец // Трение и износ.– 1983. – Т. 4. – № 5. – С. 845-853.
14. Напольский Г.М. Технологическое проектирование автотранспортных предприятий и станций технического обслуживания. [Учебник для вузов] / Г.М. Напольский– М. Транспорт, 1985 – 231с.
15. Огневий В.О., Драговенко В.В. Аналіз методів діагностування підшипникових вузлів генераторів автомобілів та області їх застосування // Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р. – Електрон. текст. дані. – 2020. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2020/paper/view/9256>.
16. Подмастерьев, К. В. Электрорезистивный метод комплексного диагностирования опор качения / К. В. Подмастерьев // Контроль. Диагностика. – 2004. - № 9. – С. 22-26.
17. Подмастерьев, К. В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К. В. Подмастерьев. – Москва : Машиностроение-1, 2001. – 376 с.
18. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство. Пер. с нем. / Титце, У., Шенк, К. – Москва : Мир, 1982. – 512 с.
19. Правила охорони праці на автомобільному транспорті : ДНАОП 0.00-1.28-97. – К. : Держнаглядохоронпраці, 1997.

20. Розенберг, Ю. А. Влияние смазочных масел на долговечность и надёжность деталей машин / Ю. А. Розенберг. – Москва : Машиностроение, 1970. – 312 с.
21. Сафонов, Л. И. Электрические прямоугольные соединители. Основные аспекты теории неподвижного электрического контакта / Л. И. Сафонов, А. Л. Сафонов // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – №4. – С. 58–62.
22. Селихов, А. В. Анализ особенностей технического диагностирования подшипниковых опор качения по характеру статистического распределения значений их электрического сопротивления / А. В. Селихов, В. Я. Варгашкин, В. В. Мишин, С. Н. Тулин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 3-2(299). 2013. – С. 68-77.
23. Соотношение оборотов двигателя // Сообщество машин и людей – Электрон. дан. – Режим доступа <http://www.drive2.ru/b/960537/> (дата звернения 07.04.2020).
24. Хольм, Р. Электрические контакты / Р. Хольм. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1961. – 464 с.
25. Хусу, А. П. Шероховатость поверхностей, теоретико-вероятностный подход / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов ; под ред. А. А. Первозванского. – Москва : Наука, 1975. – 344 с.
26. VOLKSWAGEN PASSAT 2190 с двигателем 1,6. Устройство, обслуживание, диагностика, ремонт. Иллюстрированное руководство. – Москва: ООО «Книжное издательство «За рулём», 2012. – 288 с.
27. Current-Insulating Bearings // Schaeffler group. – Электрон. дан. – Режим доступа <http://goo.gl/kNgPPI> (дата обращения 07.01.2016).
28. Prashad, H Tribology in Electrical Environments / H. Prashad. – UK: Elsevier, 2006. – 513 p.