МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
«___»_____ 2026 р.
Зав. кафедри _д.т.н., професор___
(науковий ступінь, вчене звання)
_____ __Володимир ДІДУР___
(підпис) (ініціали, прізвище)

Кваліфікаційна робота (дипломний проект)

перший (бакалаврський)
(назва освітнього рівня)

тема проекту: «Підвищення експлуатаційних характеристик колісної автотракторної техніки шляхом розробки автоматизованої системи контролю тиску в шинах»

Виконав: студент 3 курсу, групи 31к-з-ім
освітньої програми___бакалавр_____
спеціальності _208 «Агроінженерія»_
_Ружанському Сергію Вікторовичу_____
(прізвище та ініціали)
Керівник: к.т.н., доцент Пушка О.С.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Умань – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерних технологій та професійної освіти
Кафедра агроінженерії
Освітня програма «Бакалавр»
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри
_____ Володимир ДІДУР
«___» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ)

Ружанському Сергію Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Підвищення експлуатаційних характеристик колісної автотракторної техніки шляхом розробки автоматизованої системи контролю тиску в шинах»

керівник проекту Пушка Олександр Сергійович, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від
" 01 " травня 2026 р. № 01-06/130
2. Строк подання студентом проекту 18.05.2026 р.
3. Вихідні дані до проекту: класифікація систем контролю та підтримання тиску в шинах.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
аналіз стану досліджуваного питання; експериментальні дослідження; питання охорони праці; техніко-економічне обґрунтування проекту.
5. Ілюстративний матеріал: підготувати ілюстративний матеріал у вигляді презентації (до 10 слайдів) як додаток до доповіді за темою дипломного проекту: мета і завдання дослідження; особливості експлуатації модернізованої системи підтримання тиску; технологічне обґрунтування виготовлення деталі «Гвинт»; результати розрахунку економічного ефекту; висновки.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Прокопенко Е.В., доцент		

7. Дата видачі завдання 26 вересня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1.	Підбір та вивчення літературних джерел, підготовка вступу	15.10.2025 р.	
2.	Розділ 1. Огляд відомих технічних рішень системи підтримання тиску в шинах транспортних засобів	19.11.2025 р.	
3.	Розділ 2. Конструкторсько-технологічний розділ	18.12.2025 р.	
4.	Розділ 3. Охорона праці	12.02.2026 р.	
5.	Розділ 4. Техніко-економічна частина	09.03.2026 р.	
6.	Виконання ілюстративної частини проекту	15.04.2026 р.	
7.	Представлення проекту керівнику на перевірку	18.05.2026 р.	

Студент _____ Ружанський С.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проекту _____ Пушка О.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

1. ОГЛЯД ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СИСТЕМИ ПІДТРИМАННЯ ТИСКУ В ШИНАХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ 6

1.1 Значення підтримання оптимального тиску в шинах колісної автотракторної техніки 6

1.2 Класифікація систем контролю та підтримання тиску в шинах 7

1.3 Аналіз конструктивних рішень систем TPMS 8

1.4 Аналіз централізованих систем регулювання тиску CTIS 9

1.5 Особливості застосування систем підтримання тиску на автотракторній техніці 10

1.6 Переваги та недоліки відомих технічних рішень 11

1.7 Обґрунтування напряму розробки автоматизованої системи 12

2. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ 13

2.1 Обґрунтування напряму конструкторської розробки 13

2.2 Принцип роботи модернізованої системи підтримання тиску 14

2.3 Вибір принципової схеми клапанного вузла 15

2.4 Розрахунок площі дроселюючої щілини 16

2.5 Динамічний розрахунок наповнення шини повітрям 17

2.6 Розрахунок компенсації втрати тиску при пошкодженні шини 18

2.7 Розрахунок основних параметрів клапана керування 20

2.8 Вибір параметрів пружини та конструктивне виконання клапана 21

2.9 Технологічна послідовність роботи автоматизованої системи 21

2.10 Технологічне обґрунтування виготовлення деталі «Гвинт» 22

2.11 Технологічний контроль кресленика деталі 23

2.12 Службове призначення та конструктивні особливості деталі 24

2.13 Вибір заготовки 25

2.14 Вибір обладнання для виготовлення деталі 26

2.15 Вибір інструменту та контрольно-вимірювальних засобів 27

2.16 Проєктування технологічної послідовності обробки 29

2.17 Опис технологічних операцій 29

2.18 Розрахунок часу виготовлення партії деталей 30

2.19 Орієнтовна вартість виготовлення 31

3 ОХОРОНА ПРАЦІ 32

3.1 Загальні вимоги безпеки під час експлуатації та обслуговування системи контролю тиску в шинах 32
3.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів 32
3.3 Вимоги безпеки до конструкції автоматизованої системи 33
3.4 Безпека під час технічного обслуговування та ремонту 33
3.5 Пожежна безпека 34
4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА 35
4.1 Мета техніко-економічного обґрунтування 35
4.2 Вихідні дані для економічного розрахунку 35
4.3 Розрахунок капітальних витрат на впровадження системи 36
4.4 Розрахунок економії пального 37
4.5 Економія за рахунок зменшення зношування шин 38
4.6 Економія за рахунок скорочення простоїв 38
4.7 Економія часу на налаштування тиску 39
4.8 Загальний річний економічний ефект 39
4.9 Розрахунок строку окупності 40
4.10 Розрахунок коефіцієнта економічної ефективності 41
4.11 Накопичений економічний ефект 41
4.12 Аналіз чутливості строку окупності 42
ВИСНОВОК 44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 46

1. ОГЛЯД ВІДОМИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ СИСТЕМИ ПІДТРИМАННЯ ТИСКУ В ШИНАХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

1.1 Значення підтримання оптимального тиску в шинах колісної автотракторної техніки

Колісна автотракторна техніка працює в умовах постійної зміни навантаження, швидкості руху, типу опорної поверхні та режиму виконання технологічних операцій. Для тракторів, вантажних автомобілів, причепів, самохідних сільськогосподарських машин та іншої мобільної техніки стан шин безпосередньо впливає на тягово-зчіпні властивості, паливну економічність, стійкість руху, плавність ходу, прохідність і безпеку експлуатації [16, 19, 21].

Одним із найважливіших параметрів, який визначає роботу пневматичної шини, є внутрішній тиск повітря. За недостатнього тиску збільшується деформація боковин, підвищується нагрівання шини, погіршується керованість, зростає опір коченню та прискорюється зношування протектора. За надмірного тиску зменшується площа контакту шини з ґрунтом або дорогою, погіршується зчеплення, збільшується ущільнення ґрунту, підвищуються динамічні навантаження на ходову частину та агрегати машини [17, 18, 20].

Для сільськогосподарської техніки проблема вибору тиску має особливе значення, оскільки трактор протягом одного робочого циклу може рухатися польовою ділянкою, ґрунтовою дорогою та асфальтованим покриттям. У полі доцільно знижувати тиск у шинах для збільшення плями контакту, зменшення буксування та збереження структури ґрунту. На дорозі, навпаки, необхідний вищий тиск, що забезпечує стійкість руху, зменшення нагрівання шин і скорочення витрат пального [14, 15, 18].

У сучасній техніці для вирішення цієї задачі застосовують системи контролю тиску в шинах TPMS та системи централізованого регулювання тиску CTIS. У міжнародній практиці TPMS розглядається як система, що контролює тиск у шинах або зміну тиску та попереджає водія про небезпечні відхилення [10, 11]. В Україні технічне обслуговування колісних транспортних засобів також передбачає перевірку внутрішнього тиску в усіх шинах і доведення його до встановленої норми [1, 3].

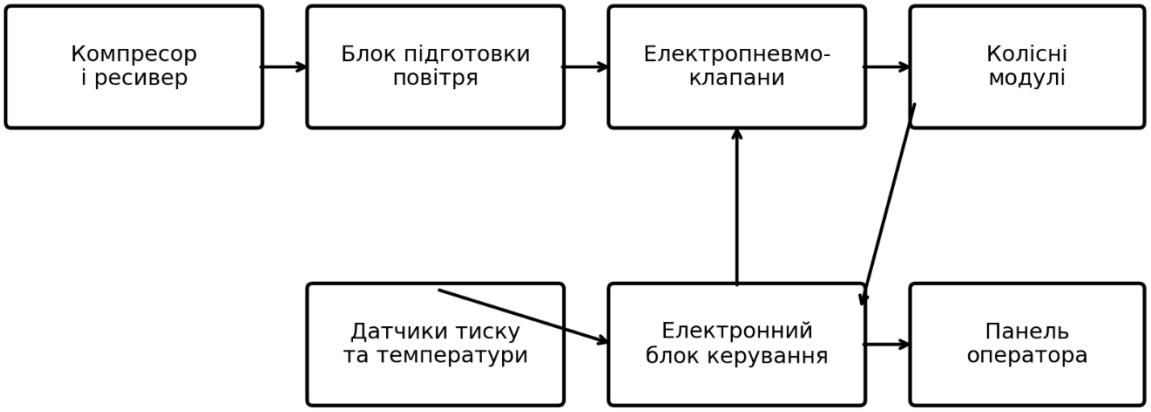


Рисунок 1.1 – Структурна схема автоматизованої системи підтримання тиску в шинах транспортного засобу

Застосування автоматизованої системи контролю та підтримання тиску дає змогу перейти від періодичного ручного контролю до безперервного моніторингу технічного стану шин. Такий підхід підвищує надійність транспортного засобу, знижує ймовірність аварійних ситуацій, дозволяє адаптувати машину до конкретних умов руху та покращує експлуатаційні характеристики колісної техніки [10, 14, 16].

1.2 Класифікація систем контролю та підтримання тиску в шинах

Відомі технічні рішення систем контролю тиску в шинах можна поділити на кілька основних груп: пасивні системи контролю, активні системи контролю, системи автоматичного підкачування, централізовані системи регулювання тиску та комбіновані інтелектуальні системи [10, 11, 14].

Пасивні системи контролю тиску не вимірюють тиск безпосередньо. Вони визначають можливе зниження тиску за непрямими ознаками, наприклад за зміною частоти обертання колеса, яку фіксують датчики антиблокувальної системи. Якщо тиск у шині знижується, змінюється її ефективний радіус кочення, а отже, виникає різниця частот обертання коліс [21, 22].

Активні системи TPMS використовують датчики тиску, встановлені всередині колеса або на вентилі. Такі датчики передають інформацію до електронного блоку керування або бортового дисплея. Активні системи можуть вимірювати не лише тиск, а й температуру повітря в шині, що важливо для попередження перегрівання, перевантаження або пошкодження шини [10, 11].

Системи автоматичного підкачування мають не лише функцію контролю, а й можливість відновлення тиску. Вони використовують джерело стисненого повітря, ресивер, пневматичні магістралі, клапани та вузли подавання повітря до коліс. Такі

системи можуть компенсувати незначні втрати повітря та підтримувати заданий тиск без участі оператора [14, 15].

Централізовані системи регулювання тиску в шинах, або CTIS, дають змогу змінювати тиск залежно від режиму експлуатації. Наприклад, для польових робіт задається нижчий тиск, для руху дорогою – вищий. Такі системи особливо доцільні для тракторів і самохідних сільськогосподарських машин, які працюють у змінних дорожньо-польових умовах [12, 13, 14].

Комбіновані інтелектуальні системи об’єднують датчики тиску, датчики температури, електронний блок керування, виконавчі клапани, алгоритми діагностики, сигналізацію та можливість обміну даними з бортовою мережею транспортного засобу [10, 11, 22].

1.3 Аналіз конструктивних рішень систем TPMS

Система TPMS призначена насамперед для своєчасного виявлення відхилень тиску від допустимого рівня. Основними елементами такої системи є датчики тиску, модуль передавання сигналу, приймальний блок, електронний блок обробки інформації та індикатор на панелі оператора [10, 11].

Датчики можуть бути внутрішніми або зовнішніми. Внутрішні встановлюються всередині колеса, зазвичай у зоні вентиля. Вони краще захищені від механічних пошкоджень, забруднення та атмосферного впливу, однак потребують демонтажу шини для обслуговування або заміни. Зовнішні датчики монтуються на вентиль колеса. Вони простіші в установленні, але більше піддаються механічним пошкодженням і впливу пилу, вологи та агресивних середовищ [10, 22].

У вантажній і сільськогосподарській техніці до TPMS висуваються підвищені вимоги, оскільки колеса працюють при значних навантаженнях, а відмова шини може призвести не лише до простою, а й до пошкодження агрегатів або аварійної ситуації. Для автотракторної техніки важливо, щоб система контролювала кожне колесо окремо, мала захист від вібрацій, пилу та вологи, забезпечувала надійний зв’язок і давала зрозуміле попередження оператору [1, 3, 10].

Відомі системи TPMS ефективні для контролю стану шин, але вони не завжди вирішують задачу адаптації тиску до умов експлуатації. Якщо система лише повідомляє про відхилення, оператор повинен самостійно виконати підкачування або зниження тиску. У польових умовах це потребує часу, додаткового обладнання та знижує

продуктивність роботи [14, 15, 16].

1.4 Аналіз централізованих систем регулювання тиску CTIS

Централізована система регулювання тиску в шинах є більш складним технічним рішенням, ніж звичайна система TPMS. Її завдання полягає не тільки у вимірюванні тиску, а й у зміні його відповідно до заданого режиму. У загальному вигляді CTIS складається з компресора, ресивера, блоку підготовки повітря, електропневматичних клапанів, датчиків тиску, магістралей подачі повітря, обертових ущільнювачів коліс, електронного блоку керування та панелі оператора [14, 15].

Принцип роботи системи полягає в тому, що оператор обирає режим руху: поле, ґрунтова дорога, шосе, транспортний режим або режим з підвищеним навантаженням. Електронний блок задає необхідний тиск і порівнює його з фактичним значенням у кожному колесі. Якщо тиск нижчий за норму, відкривається клапан подачі повітря від ресивера. Якщо тиск вищий за заданий, система відкриває клапан скидання. Після досягнення потрібного значення клапани закриваються [14, 15].

Перевага CTIS полягає у можливості швидко змінювати параметри ходової частини без тривалої зупинки машини. Для трактора це особливо важливо, оскільки робота з неправильним тиском на полі призводить до зростання буксування, перевитрати пального та ущільнення ґрунту. Водночас рух дорогою з надто низьким тиском спричиняє перегрівання шин і зниження їхнього ресурсу [16, 17, 18].

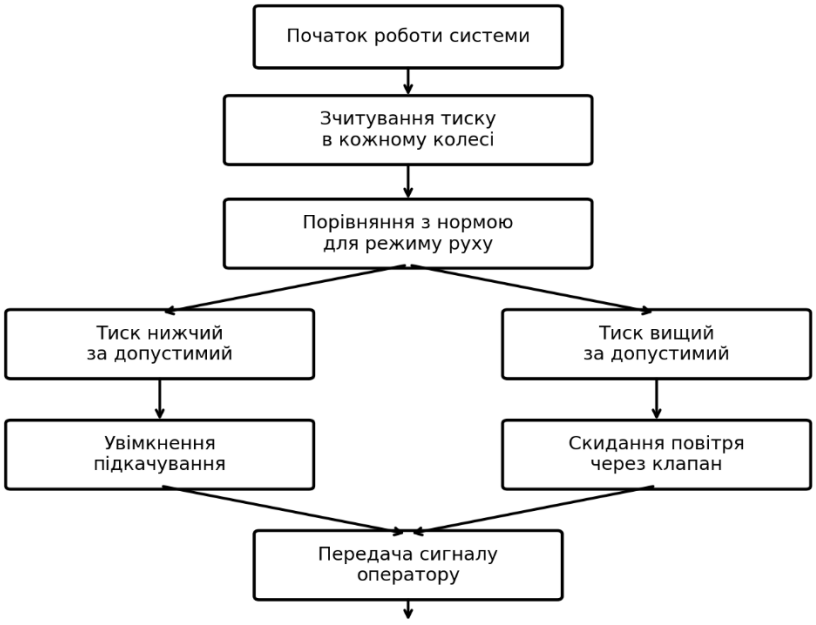


Рисунок 1.2 – Алгоритм автоматичного регулювання тиску в шинах

У сучасних сільськогосподарських шинах також враховується можливість роботи із CTIS. Конструкція таких шин орієнтована на поєднання дорожнього та польового

режимів, що дозволяє ефективніше використовувати тягові властивості машини та зменшувати негативний вплив на ґрунт [12, 13, 18].

1.5 Особливості застосування систем підтримання тиску на автотракторній техніці

Автотракторна техніка має низку особливостей, які ускладнюють застосування стандартних автомобільних систем TPMS. По-перше, трактори та самохідні сільськогосподарські машини працюють з великими шинами, значною деформацією протектора і боковини, високими навантаженнями та різними типами ґрунтів. По-друге, машина може працювати в запиленому середовищі, у вологих умовах, на нерівній поверхні, з високим рівнем вібрацій [16, 18, 19].

Для тракторів важливо забезпечити герметичне підведення повітря до колеса, яке обертається. Це може виконуватися через спеціальні обертові з’єднання, маточинні вузли, зовнішні магістралі або комбіновані канали. Найбільш уразливими елементами є ущільнення, шланги, місця з’єднання, клапани та датчики [14, 15].

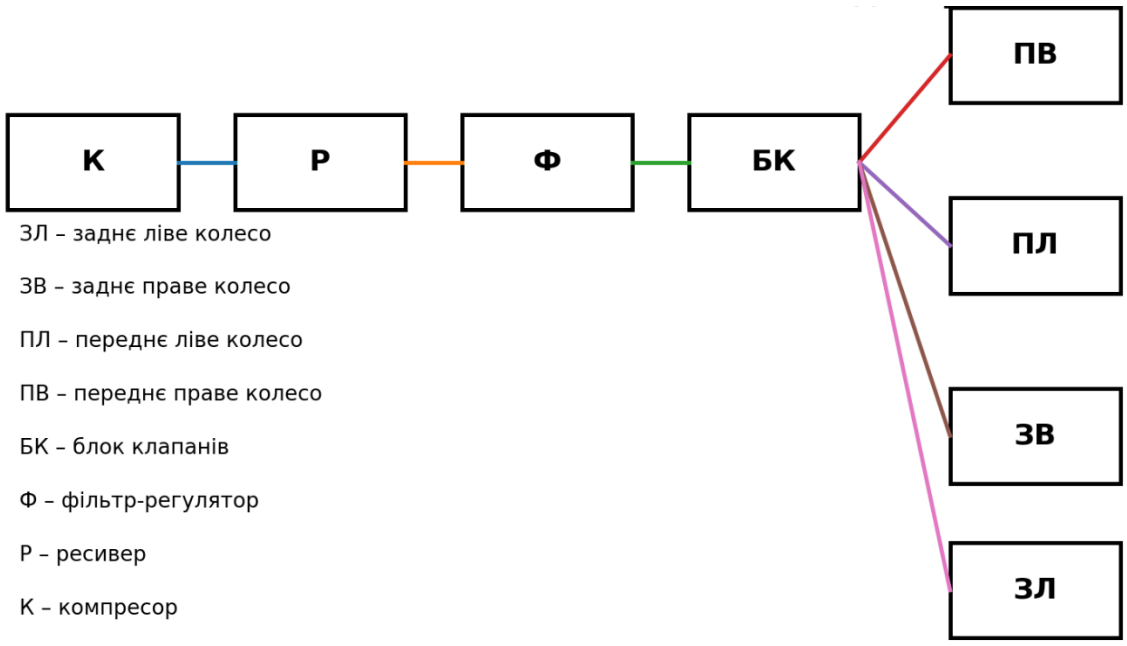


Рисунок 1.3 – Узагальнена пневматична схема системи підкачування шин

З технічного погляду до автоматизованої системи контролю тиску в шинах автотракторної техніки доцільно включити такі функції: безперервне вимірювання тиску, контроль температури, вибір режиму роботи, автоматичне підкачування, контроль герметичності, сигналізацію про несправність, ручний режим керування, запис аварійних подій та захист від некоректних команд оператора [10, 11, 14].

Орієнтовні режими тиску повинні задаватися з урахуванням типу шини,

навантаження на вісь, швидкості руху та рекомендацій виробника. У польовому режимі тиск зменшують для збільшення площі контакту. У транспортному режимі тиск підвищують для зменшення нагрівання та опору коченню [12, 13, 17].

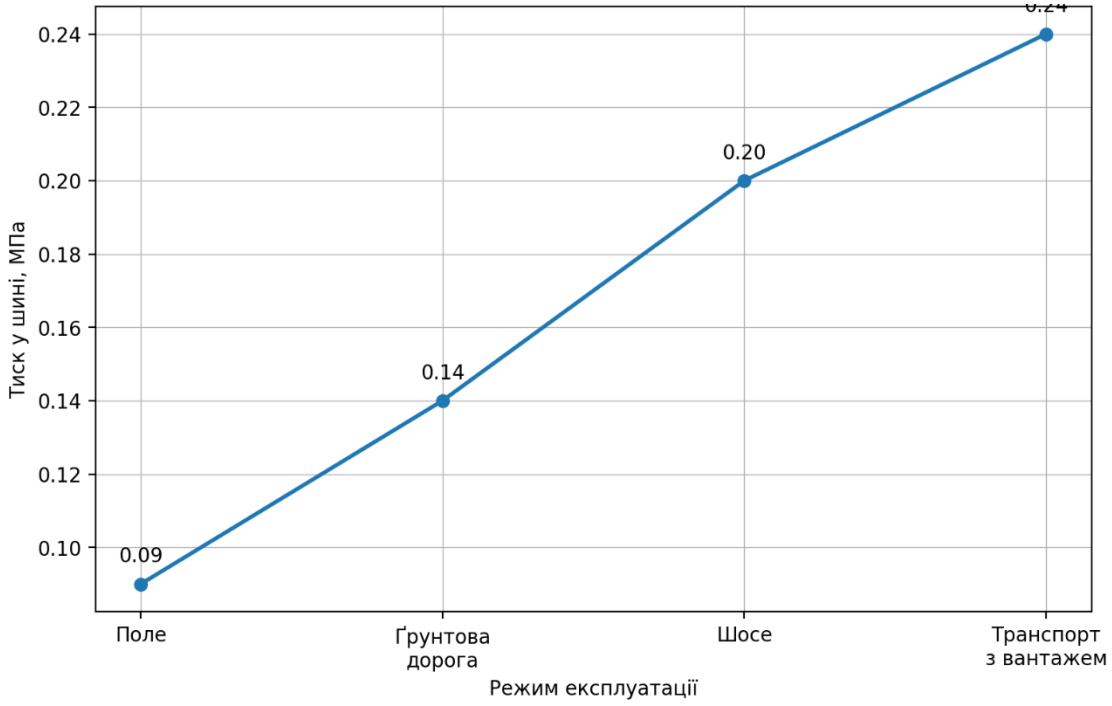


Рисунок 1.4 – Орієнтовні режими тиску для колісної автотракторної техніки

1.6 Переваги та недоліки відомих технічних рішень

Порівняння відомих технічних рішень показує, що найпростішими є системи індикації зниження тиску. Вони мають невисоку вартість, просту конструкцію та можуть бути встановлені на різні транспортні засоби. Однак їхнім головним недоліком є те, що вони не підтримують тиск автоматично, а лише повідомляють про відхилення [10, 11].

Активні TPMS з датчиками в колесах забезпечують вищу точність і можуть передавати інформацію про кожне колесо окремо. Вони підвищують безпеку руху, дозволяють своєчасно виявити повільний витік повітря, перегрівання або різке падіння тиску. Проте для аграрної техніки цього часто недостатньо, оскільки необхідно не лише контролювати, а й змінювати тиск залежно від умов роботи [10, 14, 16].

Централізовані системи регулювання тиску мають найбільший функціональний потенціал. Вони дозволяють підтримувати оптимальний тиск у шинах, зменшувати буксування, підвищувати тягові властивості, знижувати ущільнення ґрунту та покращувати паливну економічність. До недоліків CTIS належать складність конструкції, вища вартість, необхідність герметичного підведення повітря до коліс,

потреба в якісному технічному обслуговуванні та підвищені вимоги до надійності електропневматичних елементів [14, 15, 18].

1.7 Обґрунтування напряму розробки автоматизованої системи

Аналіз відомих технічних рішень показує, що підвищення експлуатаційних характеристик колісної автотракторної техніки доцільно здійснювати шляхом розробки автоматизованої системи контролю та підтримання тиску в шинах. Така система має забезпечувати адаптацію машини до різних умов експлуатації, зменшення втрат енергії на кочення, підвищення тягово-зчіпних властивостей, зниження зношування шин і покращення безпеки руху [16, 17, 18, 21].

Розроблювана система повинна мати модульну структуру. Основними модулями можуть бути блок вимірювання тиску, блок керування, блок електропневматичних клапанів, джерело стисненого повітря, пневматичні магістралі, панель оператора та система аварійної сигналізації. Для підвищення надійності доцільно передбачити контроль витоку повітря, фільтрацію та осушення стисненого повітря, захист електронних компонентів від вологи та пилу, а також можливість роботи в ручному режимі [4, 5, 6, 14].

2. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Обґрунтування напряму конструкторської розробки

Підвищення експлуатаційних характеристик колісної автотракторної техніки значною мірою залежить від стабільності тиску в шинах. Під час руху транспортного засобу по різних типах покриття змінюються опір коченню, пляма контакту шини з опорною поверхнею, величина буксування, нагрівання гуми та навантаження на елементи ходової частини. Якщо тиск у шині не відповідає режиму руху, зростають втрати енергії, погіршується керованість, прискорюється зношування протектора та збільшується ризик пошкодження шини.

У попередніх технічних рішеннях системи регулювання тиску часто передбачалося постійне підведення керуючого тиску до колісного модуля. Такий принцип роботи має суттєвий недолік: у рухомих з’єднаннях, через які повітря підводиться до колеса, можливе постійне стравлювання повітря через зазори та ущільнення. Це знижує енергоефективність системи, збільшує навантаження на компресор і погіршує стабільність роботи всієї пневматичної магістралі.

Тому в даному розділі запропоновано конструкторсько-технологічне рішення, за якого стиснене повітря подається до клапанного вузла не постійно, а лише в моменти корекції тиску. Такий підхід дозволяє зменшити втрати повітря, знизити тривалість роботи компресора та підвищити надійність системи підтримання тиску в шинах. Конструктивна ідея полягає в застосуванні модернізованого клапана, який відкривається під дією керуючого тиску, а після досягнення заданого рівня закриває канал і забезпечує збереження тиску в шині.

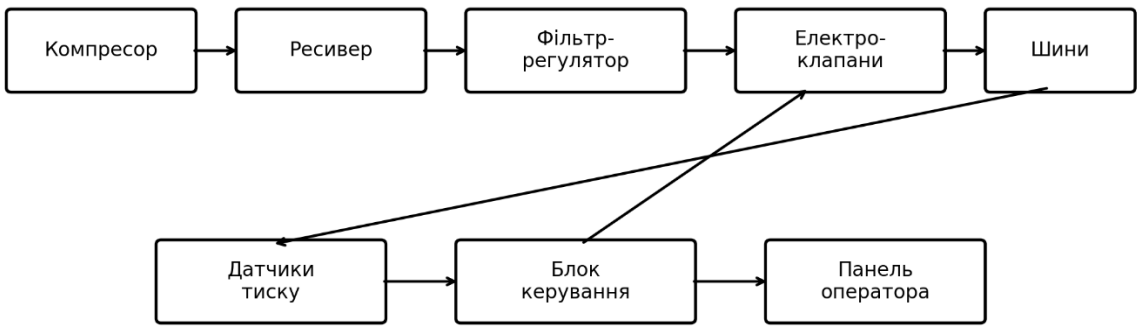


Рисунок 2.1 – Функціональна схема автоматизованої системи підтримання тиску

Запропонована система складається з компресора, ресивера, блоку підготовки повітря, електропневматичних клапанів, датчиків тиску, електронного блоку керування,

панелі оператора та колісних модулів. Компресор створює необхідний запас стисненого повітря, ресивер стабілізує подачу, фільтр-регулятор очищає повітря від вологи та забруднень, а електронний блок керування порівнює фактичний тиск із заданим значенням. Якщо тиск нижчий від норми, система відкриває канал підкачування; якщо тиск вищий – забезпечує контрольоване стравлювання.

2.2 Принцип роботи модернізованої системи підтримання тиску

У традиційній схемі підтримання тиску повітря постійно підводиться до магістралі, щоб клапан залишався в робочому стані та забезпечував необхідний тиск у шині. Така схема працездатна, але нераціональна, оскільки під час тривалої роботи утворюються втрати повітря в рухомих з'єднаннях. Особливо це помітно в системах, де повітря подається через обертові елементи маточини або спеціальні штуцери.

У модернізованому варіанті запропоновано змінити логіку роботи клапана. Пружина клапана налаштовується не на мінімальний тиск, а на верхню межу робочого діапазону. Завдяки збільшенню площі керуючої кромки клапан може відкриватися навіть при зниженому керуючому тиску, що дає можливість як підкачувати шину, так і стравлювати повітря до потрібного значення. Після завершення регулювання канал закривається, а магістраль не потребує постійного підведення повітря.

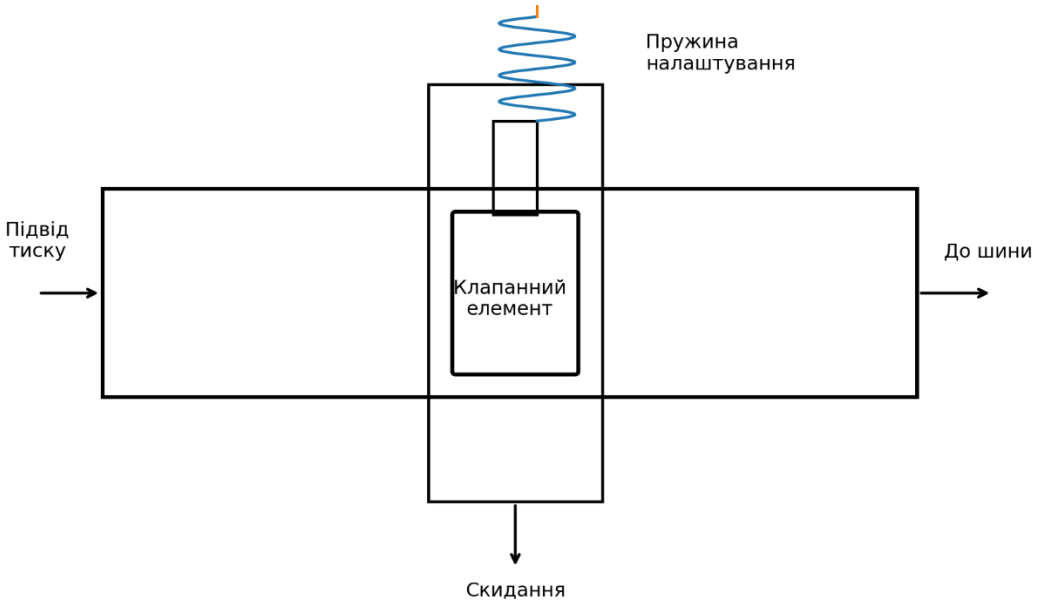


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема модернізованого клапана

Робота модернізованого клапана відбувається так. Коли необхідно підвищити тиск у шині, електронний блок відкриває електропневматичний клапан, і стиснене повітря надходить до керуючої порожнини. Тиск діє на збільшену торцеву поверхню клапанного елемента, створює зусилля, яке долає опір пружини, і відкриває прохідний

канал. Повітря надходить у шину до моменту досягнення заданого тиску. Після цього подача припиняється, а клапан повертається у закрите положення.

Якщо потрібно знизити тиск, система подає керуючий тиск меншого рівня, який відкриває канал стравлювання. Повітря виходить із шини до заданої межі, після чого клапан знову закривається. У результаті керуючий тиск використовується тільки в період регулювання, а не протягом усього часу роботи транспортного засобу.

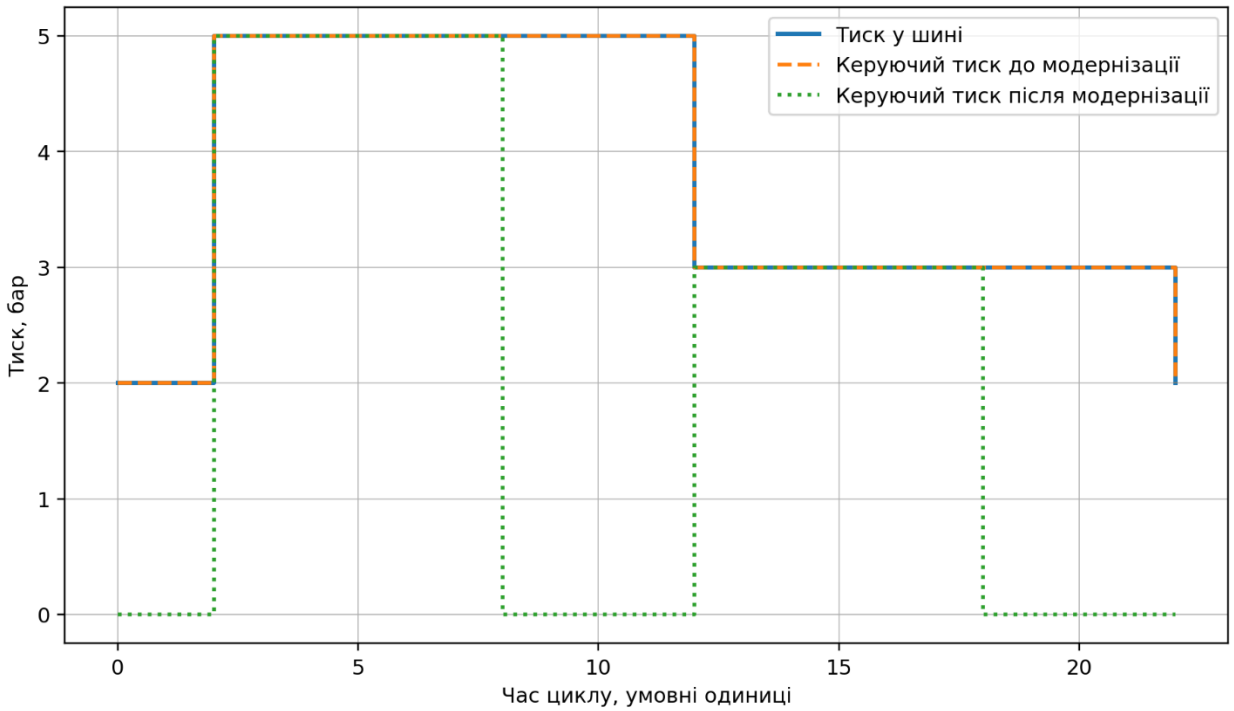


Рисунок 2.3 – Порівняння циклограм роботи системи до та після модернізації

З рисунка видно, що в попередній системі керуючий тиск фактично повторює робочий тиск у шині та підтримується протягом усього періоду експлуатації. У модернізованій системі керуючий тиск подається імпульсно – тільки під час підкачування або стравлювання. Це зменшує втрати повітря, скорочує кількість циклів роботи компресора та підвищує ресурс елементів пневмосистеми.

2.3 Вибір принципової схеми клапанного вузла

Для системи автоматичного підтримання тиску доцільно застосувати клапанний вузол, який поєднує функції подачі, перекриття та стравлювання повітря. У конструкції можуть використовуватися два основні типи регулювальних елементів: золотниковий клапан або клапан типу «сопло-заслінка». Незважаючи на конструктивні відмінності, з погляду динамічного розрахунку обидва варіанти мають спільну особливість – утворення кільцевої дроселюючої щілини.

У золотниковому клапані прохідний переріз формується зміщенням золотника

відносно кромки каналу. У клапані типу «сопло-заслінка» регулювання відбувається за рахунок зміни відстані між соплом і заслінкою. В обох випадках основними параметрами, які визначають швидкість наповнення шини повітрям, є діаметр дроселюючої щілини d та величина її відкриття h.

З технологічного погляду золотниковий клапан зручний для автомобільних і тракторних систем, оскільки дозволяє реалізувати дистанційне керування за допомогою крокового двигуна або електромагнітного приводу. Кроковий двигун може змінювати положення регулювального гвинта, а через нього – попереднє стискання пружини. Завдяки цьому система отримує можливість змінювати заданий тиск без ручного втручання оператора.

Клапан типу «сопло-заслінка» є простішим за принципом дії та може застосовуватися там, де потрібна висока чутливість до зміни тиску. Однак для автотракторної техніки більш доцільним є комбіноване рішення із золотниковим або тарілчастим клапанним елементом, оскільки така конструкція краще пристосована до пилу, вологи, вібрації та значних перепадів навантаження.

2.4 Розрахунок площі дроселюючої щілини

Для визначення раціональних параметрів клапана необхідно встановити залежність площі прохідного перерізу від діаметра дроселюючої щілини та величини її відкриття. Оскільки щілина має кільцеву форму, площу поперечного перерізу можна визначити за формулою:

$$f_{\text{др}} = \pi d h \tag{2.1}$$

де $f_{\text{др}}$ – площа поперечного перерізу дроселюючої щілини, мм²;

d – діаметр дроселюючої щілини, мм;

h – відкриття щілини, мм.

Для розрахунку прийнято діаметр дроселюючої щілини в межах від 6 до 10 мм, а відкриття – від 0,1 до 0,5 мм. Такі межі вибрано з урахуванням компактності клапанного вузла, можливості його виготовлення та потреби забезпечити достатню швидкість наповнення шини.

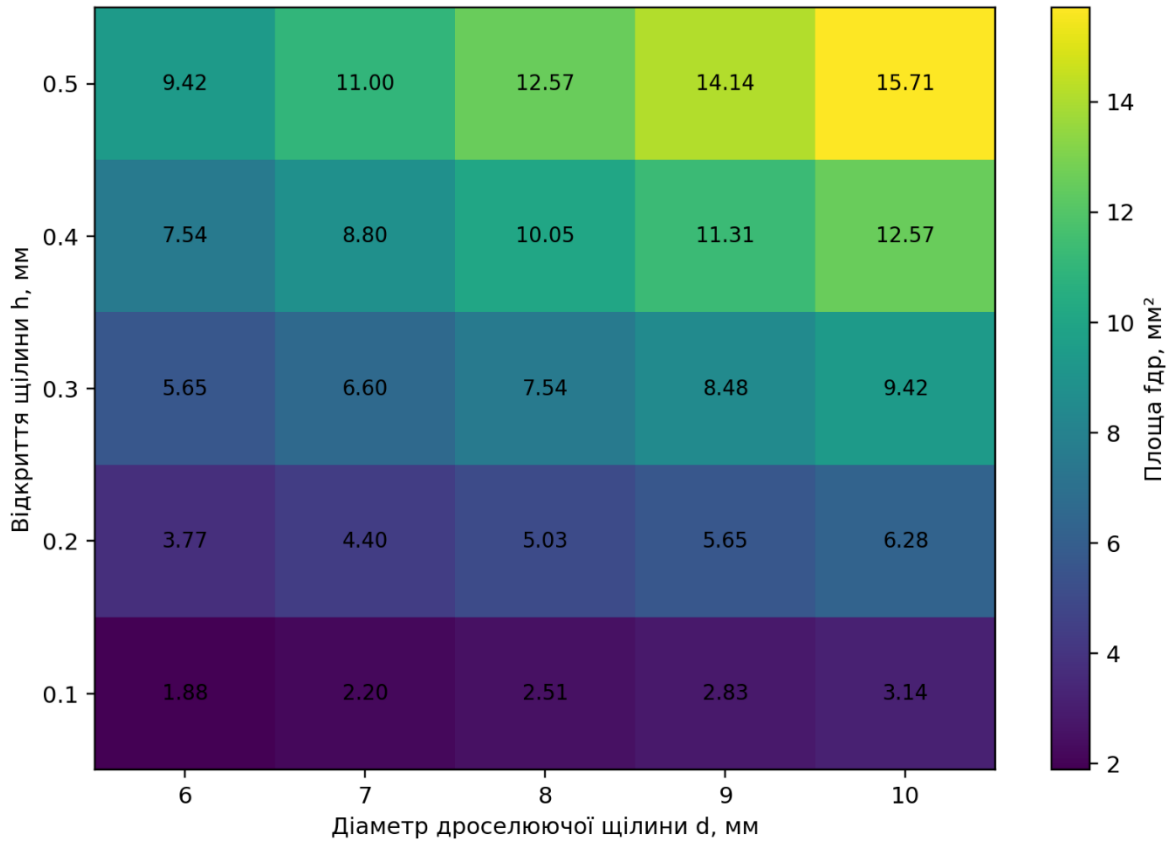


Рисунок 2.4 – Зміна площі кільцевої дроселюючої щілини залежно від d та h

З графічної залежності видно, що збільшення діаметра та відкриття щілини приводить до зростання площі прохідного перерізу. Найменше значення площі отримується при $d = 6$ мм і $h = 0{,}1$ мм:

$$f_{\text{др}} = 3{,}14 \cdot 6 \cdot 0{,}1 = 1{,}884 \text{ мм}^2$$

Найбільше значення площі в заданому діапазоні відповідає параметрам $d = 10$ мм і $h = 0{,}5$ мм:

$$f_{\text{др}} = 3{,}14 \cdot 10 \cdot 0{,}5 = 15{,}7 \text{ мм}^2$$

Отже, у межах прийнятого діапазону площа дроселюючої щілини змінюється від 1,884 до 15,7 мм². Це дає можливість регулювати інтенсивність подачі повітря та вибрати такі параметри клапана, які забезпечать швидке відновлення тиску в шині після його зниження.

2.5 Динамічний розрахунок наповнення шини повітрям

Наступним етапом є оцінка часу наповнення камери шини. Цей розрахунок потрібний для визначення того, чи зможе система за прийнятний проміжок часу підняти тиск у шині до заданого рівня. У розрахунку прийнято такі вихідні дані:

– початковий тиск у шині – $P_0 = 1$ бар;

– тиск від компресора – $P_1 = 3$ бар;

– об’єми шин – $V = 0{,}05$ м³, 0,07 м³, 0,1 м³;

– діаметр дроселюючої щілини – $d = 6…10$ мм;

– відкриття щілини – $h = 0{,}1…0{,}5$ мм.

Час наповнення залежить від об’єму шини та площі прохідного перерізу клапана. Чим більший об’єм шини, тим довше триває процес наповнення. Водночас збільшення площі дроселюючої щілини зменшує гідравлічний опір каналу й прискорює подачу повітря.

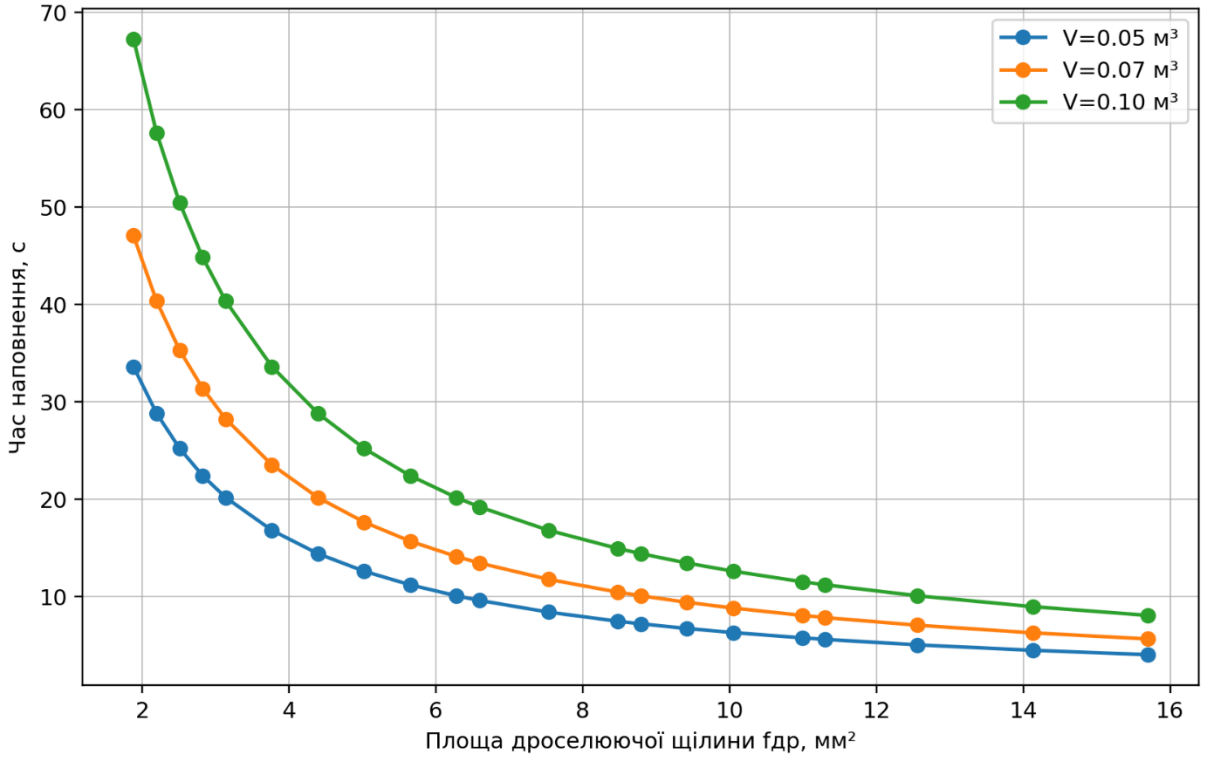


Рисунок 2.5 – Залежність часу наповнення шини від площі дроселюючої щілини

Аналіз залежностей показує, що при малих значеннях площі дроселюючої щілини час наповнення різко зростає. Це пояснюється недостатньою пропускною здатністю клапана. При збільшенні площі понад 10 мм² зменшення часу наповнення стає менш різким, однак для великих шин така різниця залишається важливою.

Для шини об’ємом 0,05 м³ при максимальному відкритті $h = 0{,}5$ мм і діаметрі $d = 10$ мм час наповнення становить приблизно 4,04 с. Для шини об’ємом 0,07 м³ за тих самих параметрів час становить близько 5,65 с, а для шини об’ємом 0,1 м³ – приблизно 8,07 с. Отримані значення свідчать, що вибраний прохідний переріз забезпечує достатню швидкість підкачування для розглянутих типорозмірів шин.

2.6 Розрахунок компенсації втрати тиску при пошкодженні шини

Під час експлуатації колісної техніки можливе поступове зниження тиску через

мікропошкодження, негерметичність вентиля або прокол. Тому система повинна не лише підкачувати шину після команди оператора, а й компенсувати втрати повітря в автоматичному режимі.

Для оцінки компенсаційної здатності системи умовний прокол розглянуто як додатковий дросельний отвір, через який повітря виходить із камери шини. Розрахунок виконано для зниження тиску на 0,5 бар, тобто з 3 бар до 2,5 бар. Площа умовного проколу приймається в діапазоні від 0,5 мм² до 12,5 мм².

Маса повітря, що втрачається при зниженні тиску, залежить від об'єму шини. Для шин об'ємом 0,05 м³, 0,07 м³ і 0,1 м³ втрата повітря зростає пропорційно збільшенню об'єму. Відповідно, більша шина потребує більшої продуктивності системи підкачування.

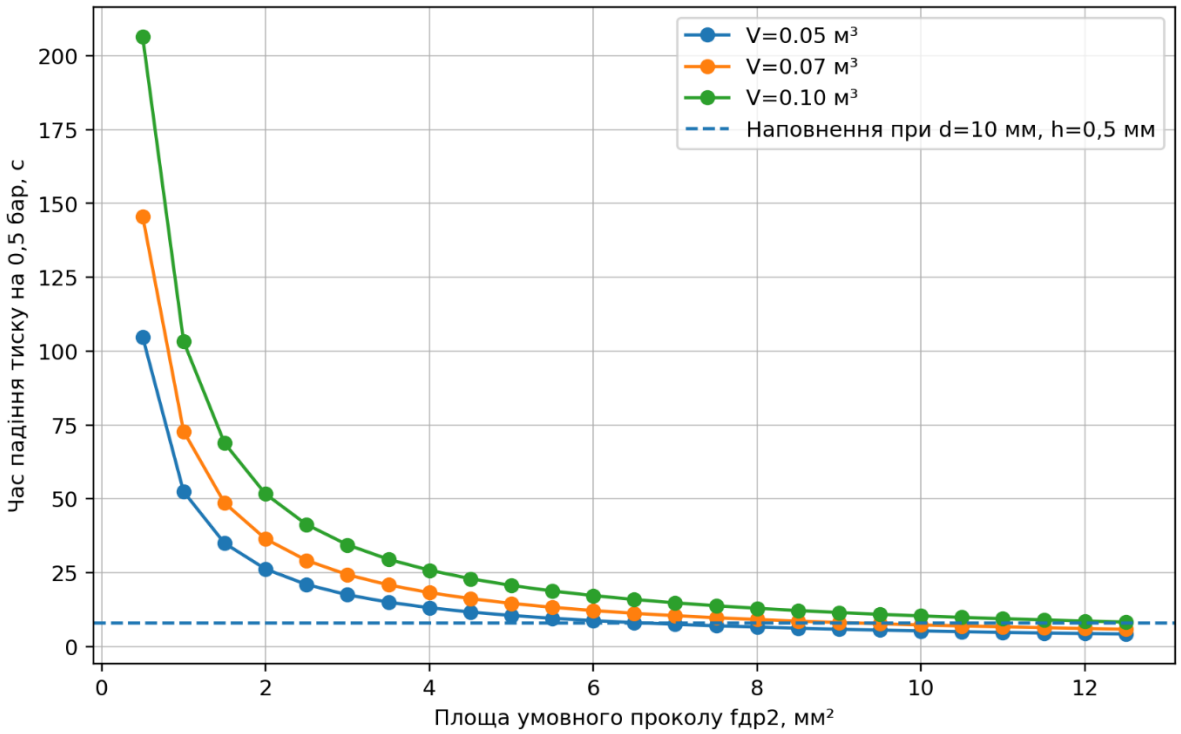


Рисунок 2.6 – Оцінка часу витоку та можливості компенсації втрати тиску

Залежності показують, що при збільшенні площі проколу час падіння тиску зменшується. Для шини об'ємом 0,05 м³ максимальний час падіння тиску на 0,5 бар при малому проколі становить близько 104 с, а мінімальний – приблизно 4,19 с. Для шини об'ємом 0,07 м³ цей діапазон становить приблизно від 145,6 с до 5,82 с. Для шини об'ємом 0,1 м³ – від 206,7 с до 8,27 с.

Порівняння цих значень із часом наповнення показує, що при параметрах $d = 10$ мм і $h = 0{,}5$ мм система здатна компенсувати втрату тиску для всіх трьох розглянутих об'ємів шин. Для найбільшої шини об'ємом 0,1 м³ час наповнення становить приблизно

8,07 с, що практично відповідає мінімальному часу падіння тиску при найбільшій розглянутій площі проколу. Отже, прийняті параметри клапана можна вважати достатніми для подальшої конструкторської розробки.

2.7 Розрахунок основних параметрів клапана керування

Основним елементом системи є клапан керування, який забезпечує відкривання та закривання каналу подачі повітря. Для його розрахунку необхідно визначити сили, що діють на клапанний елемент, а також підібрати параметри пружини. Робочий діапазон тиску приймається від 2 бар до 5 бар, тобто максимальний перепад становить 3 бар.

Сила, яка діє на торцеву поверхню клапана, визначається за формулою:

$$F = p \cdot S \tag{2.2}$$

де F – сила, що діє на клапанний елемент;

p – тиск повітря;

S – площа торцевої поверхні.

Площа круглої торцевої поверхні визначається за формулою:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \tag{2.3}$$

Якщо діаметр робочої частини клапана становить d = 0,5 см, тоді площа дорівнює:

$$S = 3{,}14 \cdot 0{,}524 = 0{,}196 \text{ см}^2$$

При тиску в шині 5 бар сила, що діє на клапан, становить:

$$F = 0{,}196 \cdot 5 = 0{,}98 \text{ кгс}$$

Отже, пружина повинна забезпечувати притискання клапанного елемента із зусиллям приблизно 1 кгс, щоб утримувати клапан у закритому положенні при тиску 5 бар.

Для забезпечення відкривання клапана при необхідності стравлювання тиску збільшується площа керуючої кромки. Якщо зовнішній діаметр пояска прийняти 2 см, а площу центральної частини врахувати як перекриту, ефективна площа керуючого пояска становитиме приблизно 2,64 см². При мінімальному керуючому тиску 2 бар сила відкривання дорівнюватиме:

$$F = 2{,}64 \cdot 2 = 5{,}28 \text{ кгс}$$

Це значення суттєво перевищує силу попереднього притискання пружини, тому клапан буде надійно відкриватися навіть при мінімальному робочому тиску. Таким чином, збільшення площі керуючої поверхні є конструктивно обґрунтованим рішенням.

2.8 Вибір параметрів пружини та конструктивне виконання клапана

Пружина в клапанному вузлі виконує дві основні функції: забезпечує закриття клапана після завершення подачі повітря та створює початкове зусилля, яке запобігає самовільному відкриванню каналу. Для нормальної роботи системи пружина повинна мати достатню жорсткість, але не створювати надмірного опору, який ускладнював би відкривання клапана при мінімальному керуючому тиску.

З урахуванням розрахованих сил доцільно застосувати пружину стискання з попереднім навантаженням, близьким до зусилля утримання клапана. Робоче навантаження пружини повинно бути більшим за зусилля, яке виникає при номінальному тиску, але меншим за силу, що створюється керуючим тиском на збільшену площу пояска. Це дозволяє забезпечити чітке спрацювання клапана без затримок і без нестабільних перехідних режимів.

Конструктивно клапан доцільно виконати у вигляді компактного змінного вузла, який можна встановлювати в корпус колісного модуля або в блок керування подачею повітря. Корпус клапана повинен мати різьбові або фланцеві з’єднання для підключення пневматичних магістралей, ущільнювальні кільця для запобігання витокам, канал підведення керуючого тиску та канал скидання повітря. Матеріал корпусу повинен бути стійким до корозії, механічного зношування та впливу вологи.

Для виготовлення клапанного елемента доцільно застосувати сталь або зносостійкий сплав із подальшою обробкою робочих поверхонь. Поверхні, які контактують з ущільненнями, повинні мати низьку шорсткість, оскільки від цього залежить герметичність і ресурс роботи вузла. Ущільнювальні елементи необхідно підбирати з матеріалів, стійких до перепадів температури, мастильних речовин і стислого повітря.

2.9 Технологічна послідовність роботи автоматизованої системи

Робота системи підтримання тиску відбувається в такій послідовності. Після запуску транспортного засобу електронний блок керування зчитує показники датчиків тиску в кожному колесі. Отримані значення порівнюються із заданим режимом, який оператор обирає залежно від умов руху: польовий режим, ґрунтова дорога, шосе або транспортний режим з вантажем.

Якщо фактичний тиск відповідає встановленим межам, система перебуває в режимі очікування, а пневматична магістраль не навантажується постійним тиском.

Якщо тиск нижчий за норму, блок керування відкриває електропневматичний клапан підкачування. Повітря з ресивера через фільтр-регулятор і клапанний вузол надходить до шини. Після досягнення заданого тиску система закриває канал подачі.

Якщо тиск перевищує допустиме значення, вмикається режим стравлювання. Клапан відкриває канал скидання, і надлишкове повітря виходить до досягнення потрібного рівня. Після цього клапан закривається. У разі швидкого падіння тиску система подає попередження оператору. Якщо падіння пов’язане з незначним витоком, система автоматично компенсує втрату. Якщо ж витік перевищує можливості компенсації, оператор отримує аварійний сигнал.

Така технологічна схема дозволяє підвищити безпеку експлуатації, скоротити час ручного обслуговування шин і зменшити втрати повітря в системі. Крім того, автоматичне підтримання тиску забезпечує кращу адаптацію техніки до змінних умов експлуатації.

У конструкторсько-технологічному розділі обґрунтовано необхідність удосконалення системи автоматичного підтримання тиску в шинах колісної автотракторної техніки. Основним недоліком попередніх схем є потреба в постійному підведенні керуючого тиску, що спричиняє втрати повітря через рухомі з’єднання та знижує ефективність системи.

Запропоновано модернізовану схему, у якій керуючий тиск подається лише під час підкачування або стравлювання повітря. Це дозволяє зменшити витрати стисненого повітря, підвищити ресурс компресора та забезпечити стабільніше підтримання тиску в шинах.

Проведено розрахунок площі кільцевої дроселюючої щілини. Встановлено, що при діаметрі $d = 10$ мм і відкритті $h = 0{,}5$ мм площа прохідного перерізу становить 15,7 мм². Такий параметр забезпечує найменший час наповнення серед розглянутих варіантів.

Для шин об’ємом 0,05 м³, 0,07 м³ і 0,1 м³ час наповнення при вибраних параметрах становить відповідно приблизно 4,04 с, 5,65 с і 8,07 с. Порівняння з часом падіння тиску при умовному проколі показало, що система здатна компенсувати втрати повітря в розглянутому діапазоні пошкоджень.

2.10 Технологічне обґрунтування виготовлення деталі «Гвинт»

Для забезпечення працездатності автоматизованої системи підтримання тиску в

шинах важливе значення має якісне виготовлення її окремих конструктивних елементів. Однією з таких деталей є гвинт, який входить до складу клапана регулювання тиску та використовується для налаштування пружини. Від точності виготовлення цієї деталі залежить стабільність роботи клапанного вузла, правильність регулювання зусилля пружини та надійність функціонування системи загалом.

Розроблення технологічного процесу виготовлення деталі повинно забезпечувати отримання необхідної точності, шорсткості поверхонь, відповідності геометричних параметрів кресленику та мінімальні виробничі витрати. Тому під час проєктування технології необхідно виконати аналіз кресленика, визначити службове призначення деталі, вибрати заготовку, обладнання, інструмент, контрольно-вимірювальні засоби та встановити раціональну послідовність механічної обробки.

2.11 Технологічний контроль кресленика деталі

Вихідним документом для розроблення технологічного процесу є робоче креслення деталі. Воно повинно містити повну інформацію про форму, розміри, матеріал, допуски, шорсткість поверхонь, різьбові елементи, канавки, фаски та інші конструктивні особливості. На основі креслення технолог визначає можливість виготовлення деталі на наявному обладнанні та обирає послідовність операцій.

Під час аналізу кресленика деталі «Гвинт» встановлено, що він містить необхідні дані для виготовлення виробу. На кресленні зазначено основні розміри, форму поверхонь, зовнішню різьбу, наскрізний отвір, канавки, фаски та округлення. Це дозволяє визначити технологічні бази, вибрати заготовку та сформувати маршрут механічної обробки.

Особливу увагу необхідно приділити точності різьбової частини та якості поверхонь, які взаємодіють з іншими елементами клапана. Оскільки гвинт виконує функцію регулювання пружини, неточність його виготовлення може призвести до зміни зусилля стискання, порушення герметичності або нестабільної роботи клапанного механізму.

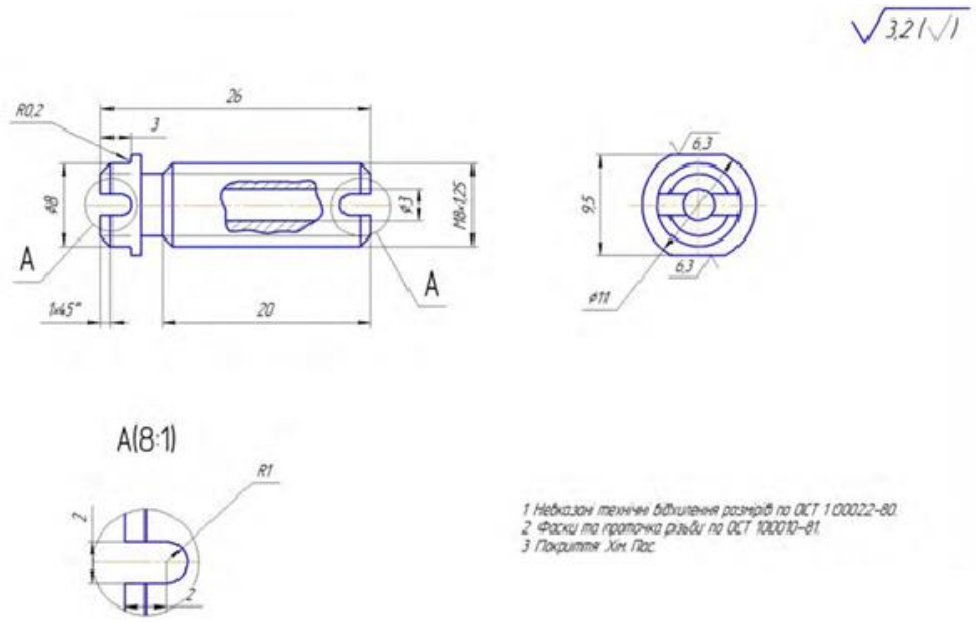


Рисунок 2.7 – Кресленик деталі «Гвинт»

За результатами контролю креслення можна зробити висновок, що конструкція деталі є технологічною, а її виготовлення доцільно виконувати на токарному обладнанні з використанням пруткової заготовки.

2.12 Службове призначення та конструктивні особливості деталі

Деталь «Гвинт» є складовою клапана регулювання тиску в шині. Її основне призначення полягає у зміні положення пружини та регулюванні її попереднього стискання. За рахунок цього забезпечується налаштування клапана на потрібний тиск відкривання або закривання.

За формою деталь належить до тіл обертання та має відносно просту конструкцію. Водночас через малі розміри та наявність різьби, канавок і отвору її виготовлення потребує точного дотримання технологічної послідовності.

Основні конструктивні елементи деталі:

- наскрізний отвір діаметром 3 мм;
- дві канавки глибиною 3 мм і шириною 2 мм;
- три фаски під кутом 45°;
- округлення радіусом 0,2 мм;
- зовнішня різьба М8×1,25;
- циліндричні поверхні різних діаметрів.

Габаритні розміри деталі становлять Ø11×26 мм. Невказані радіуси зовнішніх і внутрішніх переходів приймаються не більше 0,2 мм.

Матеріалом для виготовлення деталі обрано нержавіючу сталь 12Х18Н10Т. Такий матеріал доцільний для деталей клапанного вузла, оскільки має достатню міцність, корозійну стійкість і здатність працювати в умовах контакту з повітрям, вологою та змінними температурами.

2.13 Вибір заготовки

Для виготовлення деталі «Гвинт» обрано круглий пруток із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т діаметром 14 мм. Така заготовка є раціональною, оскільки деталь має форму тіла обертання, а найбільший діаметр готової деталі менший за діаметр прутка. Це забезпечує необхідний припуск на механічну обробку.

Довжина одного прутка становить 3000 мм. Довжина однієї заготовки приймається 30 мм. Частина прутка довжиною приблизно 200 мм залишається в зоні затискання верстата і не використовується для виготовлення деталей.

Кількість заготовок з одного прутка:

$$n = \frac{3000-200}{30} = 93 \text{ шт}$$

Отже, з одного прутка можна отримати приблизно 93 заготовки.

Для виготовлення партії з 1000 деталей потрібно:

$$N = \frac{1000}{93} = 10{,}7$$

Приймаємо 11 прутків.

Якщо вартість одного прутка становить 4 EUR, тоді загальна вартість матеріалу:

$$C = 4 \cdot 11 = 44\ EUR$$

Отже, для виготовлення 1000 деталей необхідно використати 11 прутків, а витрати на матеріал становитимуть 44 EUR.

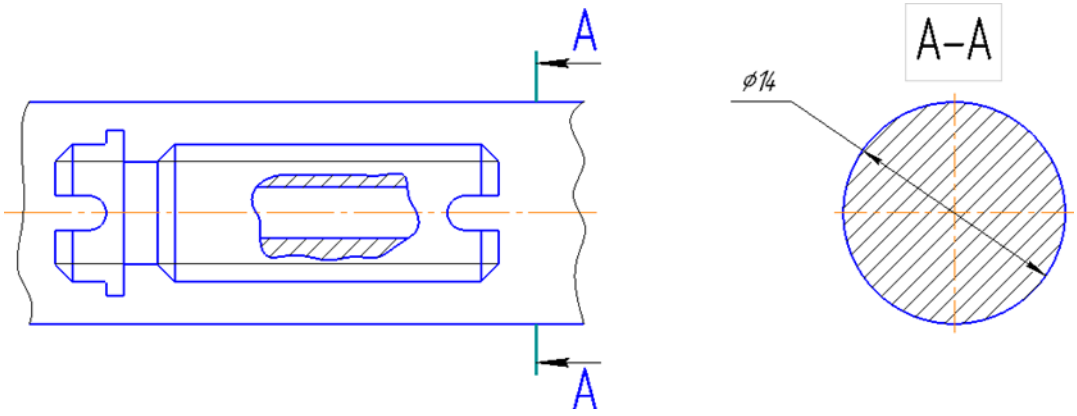


Рисунок 2.8 – Ескіз заготовки для виготовлення деталі «Гвинт»

2.14 Вибір обладнання для виготовлення деталі

Для механічної обробки деталі «Гвинт» доцільно використати токарний автомат ST-20 CNC Swiss-type Automatic Lathe. Це обладнання призначене для високоточної обробки малогабаритних деталей із пруткового матеріалу. Його застосування дозволяє забезпечити високу продуктивність, стабільність розмірів і якісне формування зовнішніх поверхонь.

Для автоматизованого подавання прутка використовується станція завантаження LNS Hydrobar 3000 mm. Її застосування дає змогу зменшити допоміжний час, підвищити продуктивність і забезпечити безперервність технологічного процесу.

Для нарізання різьби M8×1,25 може використовуватися стаціонарний електричний гвинторіз Proma ZPM-50. Це обладнання забезпечує формування різьбового профілю з необхідною точністю.



Рисунок 2.9 – Токарний автомат ST-20 CNC Swiss-type Automatic Lathe



Рисунок 2.10 – Станція завантаження прутка LNS Hydrobar 3000 mm



Рисунок 2.11 – Стаціонарний електричний гвинторіз Proma ZPM-50

Підібране обладнання дозволяє виконувати основні операції технологічного процесу: відрізання заготовки, свердління отвору, точіння зовнішніх поверхонь, формування канавок, зняття фасок, нарізання різьби та контроль готової деталі.

2.15 Вибір інструменту та контрольно-вимірювальних засобів

Для забезпечення точності виготовлення деталі необхідно застосовувати відповідний різальний інструмент і засоби контролю. Оскільки деталь має малі розміри, різьбову частину, канавки та отвір, інструмент повинен забезпечувати стабільну якість обробки та мінімальні відхилення розмірів.

Для контролю шорсткості поверхонь використовується прилад SURFTEST SJ-210. Він дозволяє перевіряти якість оброблених поверхонь після токарних операцій. Для контролю геометричних параметрів застосовується вимірювальний прилад Atorn 500627 030, який використовується для перевірки діаметрів, довжин, глибини канавок та інших розмірів.

Для обробки деталі підібрано такі інструменти:

1. свердло Sartorius діаметром 3 мм для виконання наскрізного отвору;
2. канавковий різець Walter MX22-2E150N01 для формування канавок;
3. підрізний різець Walter DWLNL2525M08 для обробки торців і зовнішніх поверхонь;
4. розточний різець Walter A08H-STFCL06 для допоміжної внутрішньої обробки;
5. відрізний різець Walter G1042L12W3ND21 для відрізання заготовки від

прутка.



Рисунок 2.12 – Свердло Sartorius 101051 0300



Рисунок 2.13 – Канавковий різець Walter MX22-2E150N01



Рисунок 2.14 – Підрізний різець Walter DWLNL2525M08



Рисунок 2.15 – Розточний різець Walter A08H-STFCL06



Рисунок 2.16 – Відрізний різець Walter G1042L12W3ND21

Застосування підібраного інструменту дозволяє виконати повний цикл механічної обробки деталі з дотриманням вимог до точності та якості.

2.16 Проєктування технологічної послідовності обробки

Технологічний процес виготовлення деталі повинен будуватися з урахуванням загальних правил механічної обробки. Насамперед обробляють поверхні, які використовуються як технологічні бази. Далі виконують операції, що поступово підвищують точність і якість поверхонь. Чорнові та чистові переходи доцільно розмежовувати, щоб уникнути накопичення похибок.

Для деталі «Гвинт» запропоновано таку послідовність технологічного процесу:

005 Заготівельна операція – відрізання заготовки від прутка Ø14 мм довжиною 30 мм.

010 Токарна операція – обробка першої сторони деталі. На цьому етапі виконують свердління отвору Ø3 мм, підрізання торця, точіння поверхні Ø8 мм, нарізання різьби М8×1,25, зняття фаски та формування канавки.

015 Токарна операція – обробка другої сторони деталі після перевстановлення. Виконують підрізання поверхні Ø11 мм, торцеву обробку, точіння до Ø8 мм, зняття фаски та формування поверхні Ø6 мм.

Для розрахунку режимів обробки прийнято: $n = 1000$ об/хв; $f_n = 0{,}05$ мм/об $k_c = 200$ Н/мм^2.

де n – частота обертання шпинделя;

f_n – подача на один оберт;

k_c – питома сила різання.

2.17 Опис технологічних операцій

На заготівельній операції виконується відрізання заготовки від круглого прутка

діаметром 14 мм. Довжина заготовки становить 30 мм. Для цього використовується відрізний різець. Орієнтовний час виконання операції – 8,7 с.

Після закріплення заготовки у верстаті виконується свердління наскрізного отвору Ø3 мм. Довжина свердління приймається 40 мм, що забезпечує повне проходження інструмента через деталь. Час виконання – 36 с.

Далі виконується підрізання поверхні Ø14 мм до довжини 29 мм. Ця операція забезпечує формування базової торцевої поверхні. Час виконання – 3,6 с.

Після цього проводиться точіння поверхні до Ø8 мм на довжині 20 мм. Ця поверхня є основною робочою частиною гвинта, тому її обробка повинна забезпечувати необхідну точність. Час виконання – 30 с.

Наступним переходом є нарізання зовнішньої різьби М8×1,25 на довжині 20 мм. Різьба забезпечує можливість переміщення гвинта під час налаштування пружини клапана. Час виконання – 25 с.

Потім виконується зняття фаски 1×45°, що необхідно для усунення гострих кромок і полегшення складання. Час виконання – 0,4 с.

Після цього формується канавка глибиною 2 мм, шириною 2 мм і радіусом 1 мм. Для цього застосовується канавковий різець. Час виконання – 2,3 с.

Після обробки першої сторони деталь перевстановлюється. На другому установі виконується підрізання поверхні Ø11 мм на довжині 9 мм. Час виконання – 20,4 с.

Далі підрізається торець Ø11 мм на довжині 3 мм. Цей перехід потрібний для доведення деталі до остаточного розміру. Час виконання – 18 с.

Після цього виконується точіння діаметра до Ø8 мм на довжині 3 мм. Час виконання – 15 с.

Наступним переходом є зняття фаски 1×45°. Час виконання – 0,4 с.

Завершальною операцією є підрізання поверхні Ø6 мм на довжині 2 мм. Час виконання – 25 с.

Після завершення механічної обробки деталь проходить контроль розмірів, перевірку різьби, огляд канавок, фасок і контроль якості поверхонь.

2.18 Розрахунок часу виготовлення партії деталей

Загальний час виготовлення однієї деталі визначається як сума тривалості всіх технологічних переходів. За результатами розрахунку він становить: $t = 203{,}5$ с.

Для партії з 1000 деталей загальний час виготовлення дорівнює:

$$t_{заг} = 203{,}5 \cdot 1000 = 203500 \text{ с}$$

Переведемо це значення у хвилини:

$$t_{заг} = \frac{203500}{60} = 3391 \text{ хв}$$

У годинах:

$$t_{заг} = \frac{3391}{60} = 56{,}5 \text{ год}$$

У добах:

$$t_{заг} = \frac{56{,}5}{24} = 2{,}35 \text{ доби}$$

Отже, для виготовлення партії з 1000 деталей потрібно приблизно 56,5 год, або 2,35 доби без урахування додаткових організаційних перерв, переналагодження верстата та міжопераційного контролю.

2.19 Орієнтовна вартість виготовлення

Вартість виготовлення партії деталей складається з витрат на матеріал, різальний інструмент, контрольно-вимірювальні засоби та технологічне оснащення. Витрати на матеріал становлять 44 EUR, оскільки для виготовлення партії потрібно 11 прутків вартістю 4 EUR кожний.

До загальної вартості також входять витрати на вимірювальні прилади, різальний інструмент та інші складові технологічного забезпечення. Загальна орієнтовна вартість виготовлення партії з 1000 деталей становить 4254 EUR.

У виробничих умовах повна собівартість може бути більшою, оскільки додатково враховуються витрати на електроенергію, оплату праці оператора, амортизацію обладнання, мастильно-охолоджувальні рідини, технічне обслуговування верстатів і контроль готової продукції.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Загальні вимоги безпеки під час експлуатації та обслуговування системи контролю тиску в шинах

Охорона праці під час експлуатації колісної автотракторної техніки з автоматизованою системою контролю тиску в шинах має забезпечувати безпечні умови роботи оператора, ремонтного персоналу та інших працівників, які перебувають у зоні обслуговування машини. Основні вимоги до організації безпечних умов праці регламентуються системою управління охороною праці та загальними вимогами безпечності машин [4, 5].

До робіт з перевірки, ремонту та налагодження системи допускаються працівники, які пройшли інструктаж з охорони праці, мають відповідну кваліфікацію, ознайомлені з будовою системи та правилами безпечного виконання шиномонтажних і пневматичних робіт [7, 8].

Перед початком обслуговування машина повинна бути встановлена на рівному майданчику, загальмована стоянковим гальмом, двигун вимкнений, а колеса зафіксовані противідкотними упорами. Такі заходи необхідні для запобігання самовільному руху машини та травмуванню працівників під час виконання ремонтних операцій [7].

Небезпека під час обслуговування шин пов’язана з можливим раптовим руйнуванням шини, зривом замкового кільця, від’єднанням шланга під тиском, витоком стисненого повітря, механічним травмуванням під час демонтажу колеса та ураженням електричним струмом під час ремонту електронних компонентів [6, 7, 8].

3.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час експлуатації та технічного обслуговування системи підтримання тиску в шинах можуть виникати такі небезпечні й шкідливі фактори: підвищений тиск у пневматичній системі, рухомі частини машини, можливе падіння колеса або інструменту, підвищений рівень шуму від компресора, запиленість робочої зони, недостатнє освітлення, електрична напруга в колах керування, а також психофізіологічне навантаження на оператора [4, 5, 7].

Пневматична система становить підвищену небезпеку через накопичену енергію стисненого повітря. Раптове руйнування шланга або з’єднання може призвести до травмування працівника. Тому всі магістралі повинні бути розраховані на робочий тиск

із необхідним запасом міцності, а з’єднання – герметичними та захищеними від механічних пошкоджень [5, 7].

Електронний блок керування, датчики та виконавчі клапани живляться від електричної мережі транспортного засобу. Коротке замикання може спричинити перегрівання проводів, пошкодження електроніки або займання ізоляції. Тому електричні кола повинні мати запобіжники, якісну ізоляцію, захист від вологи та надійне кріплення проводів [6, 9].

3.3 Вимоги безпеки до конструкції автоматизованої системи

Автоматизована система контролю тиску в шинах повинна бути спроєктована так, щоб її експлуатація не створювала додаткової небезпеки для оператора та ремонтного персоналу. У конструкції необхідно передбачити запобіжний клапан, який обмежує максимальний тиск у системі, фільтр очищення повітря, захист від потрапляння вологи, надійне кріплення пневматичних магістралей і можливість аварійного відключення системи [5, 6].

Датчики тиску мають бути розміщені так, щоб вони не пошкоджувалися під час руху, очищення, миття або ремонту машини. Електропневматичні клапани повинні бути доступними для технічного обслуговування, але захищеними від бруду, вологи та ударних навантажень [6, 14].

Програмне забезпечення системи повинно мати захист від помилкових команд. Наприклад, під час руху з високою швидкістю система не повинна дозволяти встановлення надто низького тиску, який може спричинити перегрівання або пошкодження шини. У разі несправності датчика або витоку повітря оператор повинен отримати чітке попередження на панелі керування [10, 11].

3.4 Безпека під час технічного обслуговування та ремонту

Перед проведенням технічного обслуговування системи необхідно скинути тиск у відповідній ділянці пневматичної магістралі, відключити електроживлення та переконатися у відсутності залишкового тиску. Забороняється роз’єднувати трубопроводи, шланги або клапани, якщо система перебуває під тиском [7, 8].

Перевірку герметичності слід виконувати безпечними методами, наприклад за допомогою мильного розчину або спеціальних засобів для виявлення витоків. Використання відкритого вогню для пошуку витоків забороняється, оскільки це може спричинити займання мастильних матеріалів або гумових елементів [7, 9].

Під час роботи з колесами необхідно застосовувати справні домкрати, підставки, гайковерти та інший інструмент. Піднятий транспортний засіб не можна залишати лише на домкраті без страхувальних опор. Демонтаж і монтаж великогабаритних коліс слід виконувати з використанням підіймально-транспортних засобів або спеціальних візків [7, 8].

3.5 Пожежна безпека

Пожежна безпека під час експлуатації системи контролю тиску в шинах пов’язана насамперед із наявністю електричних кіл, компресорного обладнання, мастильних матеріалів, гумових виробів і пилу. Для запобігання пожежі необхідно регулярно перевіряти стан електропроводки, ізоляції, контактних з’єднань і запобіжників [6, 9].

Компресор та електропневматичні клапани повинні бути встановлені так, щоб забезпечувався відвід тепла та доступ для огляду. У зоні ремонту необхідно мати первинні засоби пожежогасіння: порошковий або вуглекислотний вогнегасник, ящик з піском, протипожежний інвентар. Працівники повинні знати порядок дій у разі пожежі, місце розташування вогнегасників і шляхи евакуації [9].

Висновок до розділу охорони праці

У розділі охорони праці розглянуто основні небезпечні та шкідливі фактори, які можуть виникати під час експлуатації, технічного обслуговування та ремонту автоматизованої системи контролю тиску в шинах колісної автотракторної техніки. Визначено, що найбільшу небезпеку становлять роботи з пневматичною системою під тиском, шиномонтажні операції, електричні кола керування та механічне переміщення великогабаритних коліс [4, 5, 7].

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно передбачити запобіжні клапани, захист пневматичних магістралей, надійне електричне з’єднання, аварійну сигналізацію, можливість ручного відключення системи та дотримання правил безпечного обслуговування шин [5, 6, 7].

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Мета техніко-економічного обґрунтування

Метою техніко-економічного розділу є визначення доцільності впровадження автоматизованої системи контролю та підтримання тиску в шинах колісної автотракторної техніки. Запропонована система призначена для автоматичного вимірювання тиску, підтримання його на заданому рівні, компенсації незначних втрат повітря та адаптації машини до різних умов експлуатації.

Економічна доцільність такої розробки визначається не лише вартістю виготовлення та встановлення системи, а й експлуатаційним ефектом, який вона забезпечує. Основними джерелами економії є зменшення витрати пального, зниження інтенсивності зношування шин, скорочення простоїв через втрату тиску, зменшення часу ручного контролю та підкачування шин, а також підвищення продуктивності використання техніки.

У другому розділі було обґрунтовано конструкцію системи, вибрано параметри клапанного вузла та встановлено, що при діаметрі дроселюючої щілини $d = 10$ мм і відкритті $h = 0{,}5$ мм система здатна забезпечити достатню швидкість наповнення шин різного об’єму. Також у роботі наведено орієнтовну вартість виготовлення партії деталей «Гвинт» у кількості 1000 шт., яка становить 4254 EUR, а час виготовлення партії – 56,5 год
.

4.2 Вихідні дані для економічного розрахунку

Для виконання техніко-економічного розрахунку приймаємо такі вихідні дані таблиця 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні данні проєкту

Показник	Позначення	Значення
Кількість машин, для яких розглядається система	n	1 од.
Річний фонд роботи техніки	$T_{\text{р}}$	900 год/рік
Середня витрата пального без системи	q	10 л/год
Орієнтовна ціна дизельного пального	$Ц_{\text{п}}$	60 грн/л
Очікуване зниження витрати пального	$Е_{\text{п}}$	5 %
Кількість переходів між режимами роботи за рік	$N_{\text{п}}$	120
Середній час ручного	$t_{\text{р}}$	15 хв

контролю та підкачування шин		
Вартість однієї машино-години	$С_{мг}$	450 грн/год
Річні витрати на технічне обслуговування системи	$С_{то}$	5000 грн/рік

Прийняті значення є розрахунковими та можуть уточнюватися залежно від типу трактора, умов експлуатації, вартості комплектуючих, вартості пального та фактичної інтенсивності використання техніки.

4.3 Розрахунок капітальних витрат на впровадження системи

Капітальні витрати на впровадження автоматизованої системи контролю тиску в шинах включають вартість основних елементів системи, монтажних матеріалів і робіт зі встановлення. До складу системи входять датчики тиску, електронний блок керування, електропневматичні клапани, пневматичні магістралі, панель оператора, клапанний вузол, а також елементи підготовки та подачі стисненого повітря.

Орієнтовна структура капітальних витрат наведена в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Орієнтовні капітальні витрати на впровадження системи

Складова витрат	Вартість, грн
Датчики тиску	4800
Електронний блок керування	6500
Блок електропневматичних клапанів	7200
Пневматичні магістралі та фітинги	4500
Компресор або модернізація ресивера	9000
Панель оператора	3500
Клапанний вузол	5800
Монтаж і налагодження	6000
Разом	47300

Загальні капітальні витрати визначаємо за формулою:

$$К = C_д + C_б + C_к + C_м + C_п + C_в + C_{мон} \quad (4.1)$$

де К – загальні капітальні витрати, грн;

$C_д$ – вартість датчиків тиску;

$C_б$ – вартість електронного блоку керування;

$C_к$ – вартість клапанів;

$C_м$ – вартість магістралей і фітингів;

$C_п$ – вартість панелі оператора;

$C_{в}$ – вартість клапанного вузла;

$C_{мон}$ – витрати на монтаж і налагодження.

$$К = 4800 + 6500 + 7200 + 4500 + 9000 + 3500 + 5800 + 6000 = 47300 \text{ грн}$$

Отже, орієнтовні капітальні витрати на встановлення системи становлять 47300 грн.

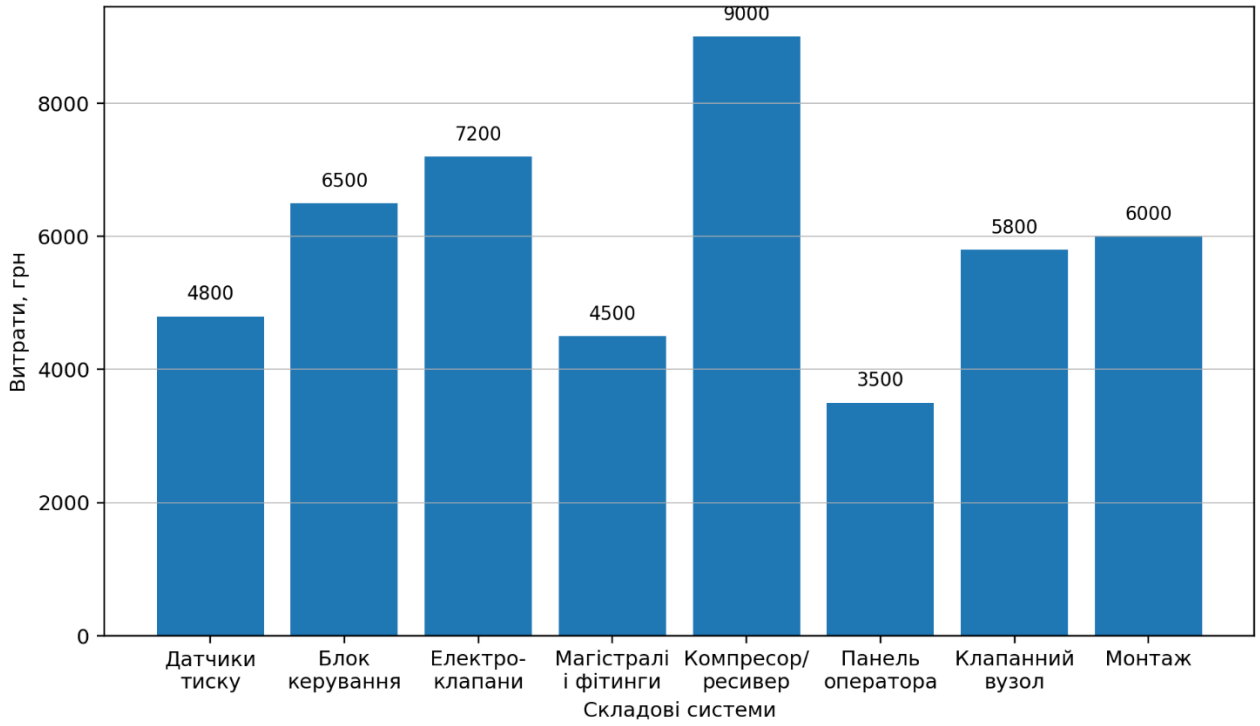


Рисунок 4.1 – Структура капітальних витрат на впровадження системи

З рисунка видно, що найбільшу частку капітальних витрат становлять компресор або модернізація ресивера, електропневматичні клапани, електронний блок керування і монтажні роботи. Це пояснюється тим, що саме ці елементи забезпечують автоматичне регулювання тиску, подачу повітря та надійну роботу системи в умовах експлуатації автотракторної техніки.

4.4 Розрахунок економії пального

Одним із головних джерел економічного ефекту є зменшення витрати пального. Підтримання оптимального тиску в шинах зменшує опір коченню, знижує буксування на ґрунті та покращує тягово-зчіпні властивості машини. Особливо це важливо для тракторів, які протягом робочого дня можуть переходити від польових робіт до транспортних операцій.

Річну витрату пального без використання системи визначаємо за формулою:

$$Q_0 = T_p \cdot q \tag{4.2}$$

де Q_0 – річна витрата пального, л;

T_p – річний фонд роботи техніки, год;

q – середня витрата пального, л/год.

$$Q_0 = 900 \cdot 10 = 9000 \text{ л}$$

Економія пального при зниженні витрати на 5 %:

$$Q_e = Q_0 \cdot \frac{E_p}{100} \tag{4.3}$$

$$Q_e = 9000 \cdot \frac{5}{100} = 450 \text{ л}$$

Грошовий ефект від економії пального:

$$E_{\text{пал}} = Q_e \cdot Ц_{\text{п}} \tag{4.4}$$

$$E_{\text{пал}} = 450 \cdot 60 = 27000 \text{ грн/рік}$$

Отже, за рахунок зменшення витрати пального річна економія становить 27000 грн.

4.5 Економія за рахунок зменшення зношування шин

Неправильний тиск у шинах призводить до нерівномірного зношування протектора, підвищеного нагрівання боковин і збільшення ризику пошкодження каркаса. Автоматизована система підтримання тиску дозволяє зменшити ці негативні явища, оскільки забезпечує роботу шини в більш раціональному режимі.

Для розрахунку приймаємо, що річна вартість зношування комплекту шин для однієї машини становить 18000 грн/рік. Очікуване зменшення зношування завдяки правильному тиску приймаємо на рівні 15 %.

Річна економія за рахунок збільшення ресурсу шин:

$$E_{\text{шин}} = C_{\text{шин}} \cdot \frac{15}{100} \tag{4.5}$$

$$E_{\text{шин}} = 18000 \cdot 0{,}15 = 2700 \text{ грн/рік}$$

Отже, економія за рахунок зменшення зношування шин становить 2700 грн/рік.

4.6 Економія за рахунок скорочення простоїв

Падіння тиску в шині або необхідність ручного контролю часто призводять до простоїв техніки. Якщо оператор змушений зупиняти машину для перевірки тиску, підкачування або усунення незначного витоку, зменшується продуктивний час роботи агрегату.

Для розрахунку приймаємо, що протягом року виникає приблизно 2 простої, пов’язані з падінням тиску або необхідністю додаткового обслуговування шин. Тривалість одного простою – 3 год, вартість машино-години – 350 грн/год.

Річні втрати від простоїв без системи:

$$C_{\text{пр}} = n_{\text{пр}} \cdot t_{\text{пр}} \cdot C_{\text{год}} \tag{4.6}$$

$$C_{\text{пр}} = 2 \cdot 3 \cdot 350 = 2100 \text{ грн/рік}$$

Отже, за рахунок скорочення простоїв можна отримати економію 2100 грн/рік.

4.7 Економія часу на налаштування тиску

Під час роботи автотракторної техніки часто виникає потреба змінювати тиск у шинах залежно від умов руху. Наприклад, у полі доцільно знижувати тиск для збільшення площі контакту, а під час руху дорогою – підвищувати його для зменшення нагрівання шини та опору коченню.

За ручного способу контролю оператор витрачає час на зупинку, перевірку тиску, підключення шланга, підкачування або стравлювання повітря. Автоматизована система дозволяє виконувати ці дії без тривалого простою, що забезпечує додатковий економічний ефект.

Приймаємо, що протягом року відбувається 120 переходів між режимами роботи. Середній час, який економиться при одному переході, становить 15 хв, або 0,25 год.

Загальна економія часу:

$$T_e = N_p \cdot t_p \tag{4.7}$$

$$T_e = 120 \cdot 0{,}25 = 30 \text{ год/рік}$$

Грошова оцінка економії часу:

$$E_{\text{час}} = T_e \cdot C_{\text{мг}} \tag{4.8}$$

$$E_{\text{час}} = 30 \cdot 450 = 13500 \text{ грн/рік}$$

Отже, економія за рахунок скорочення часу налаштування тиску становить 13500 грн/рік.

4.8 Загальний річний економічний ефект

Загальний річний економічний ефект визначається як сума всіх складових економії:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{пал}} + E_{\text{шин}} + E_{\text{пр}} + E_{\text{час}} \tag{4.9}$$

$$E_{\text{заг}} = 27000 + 2700 + 2100 + 13500 = 45300 \text{ грн/рік}$$

Під час експлуатації системи необхідно врахувати витрати на її технічне обслуговування: перевірку датчиків, герметичності магістралей, електропневматичних клапанів, фільтрів та електричних з’єднань. Приймаємо ці витрати на рівні 5000 грн/рік.

Чистий річний економічний ефект:

$$E_{\text{ч}} = E_{\text{заг}} - C\text{ТО} \tag{4.10}$$

$$E_{\text{ч}} = 45300 - 5000 = 40300 \text{ грн/рік}$$

Отже, чистий річний економічний ефект від впровадження системи становить 40300

грн/рік.

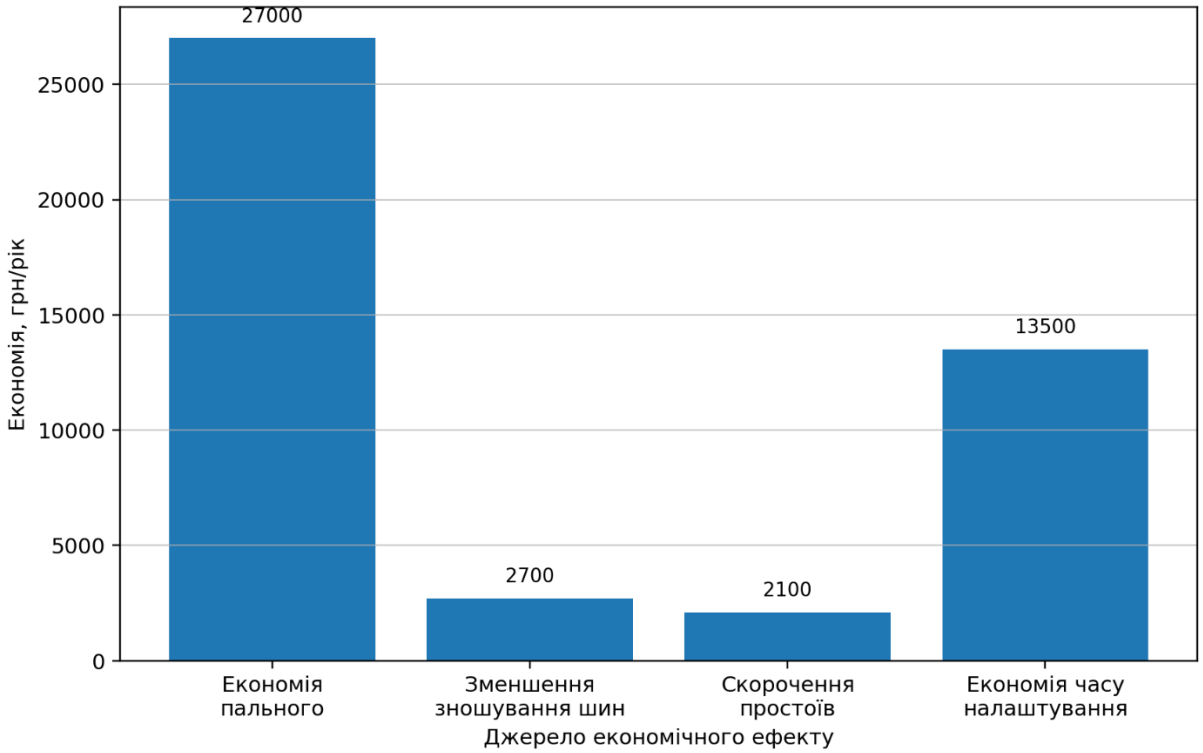


Рисунок 4.2 – Структура річної економії від застосування системи

Найбільшу частку економічного ефекту забезпечує зменшення витрати пального. Другою важливою складовою є економія часу на налаштування тиску, оскільки автоматизована система зменшує потребу в ручному обслуговуванні шин під час переходу між режимами роботи.

4.9 Розрахунок строку окупності

Строк окупності визначає період, протягом якого капітальні витрати на впровадження системи компенсуються за рахунок отриманого чистого економічного ефекту.

Формула строку окупності:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{E_{\text{ч}}} \tag{4.11}$$

де $T_{\text{ок}}$ – строк окупності, років;

K – капітальні витрати, грн;

$E_{\text{ч}}$ – чистий річний економічний ефект, грн/рік.

$$T_{\text{ок}} = \frac{47300}{40300} = 1{,}17 \text{ року}$$

Отже, строк окупності автоматизованої системи контролю тиску в шинах становить приблизно 1,17 року, тобто близько 14 місяців.

4.10 Розрахунок коефіцієнта економічної ефективності

Коефіцієнт економічної ефективності визначає, яку частку від капітальних витрат становить річний чистий ефект:

$$E_k = \frac{E_ч}{K} \tag{4.12}$$

$$E_k = \frac{40300}{47300} = 0{,}85$$

Отримане значення означає, що за один рік експлуатації система повертає приблизно 85 % вкладених коштів. Це свідчить про достатньо високу економічну доцільність упровадження розробки.

4.11 Накопичений економічний ефект

Для оцінки ефективності системи протягом кількох років визначимо накопичений економічний ефект. У перший рік враховуються капітальні витрати, тому початкове значення є від'ємним:

$$E_{нак} = -K + E_ч \cdot t \tag{4.13}$$

де t – кількість років експлуатації.

Таблиця 4.3 – Накопичений економічний ефект

Рік експлуатації	Накопичений ефект, грн
0	-47300
1	-7000
2	33300
3	73600
4	113900

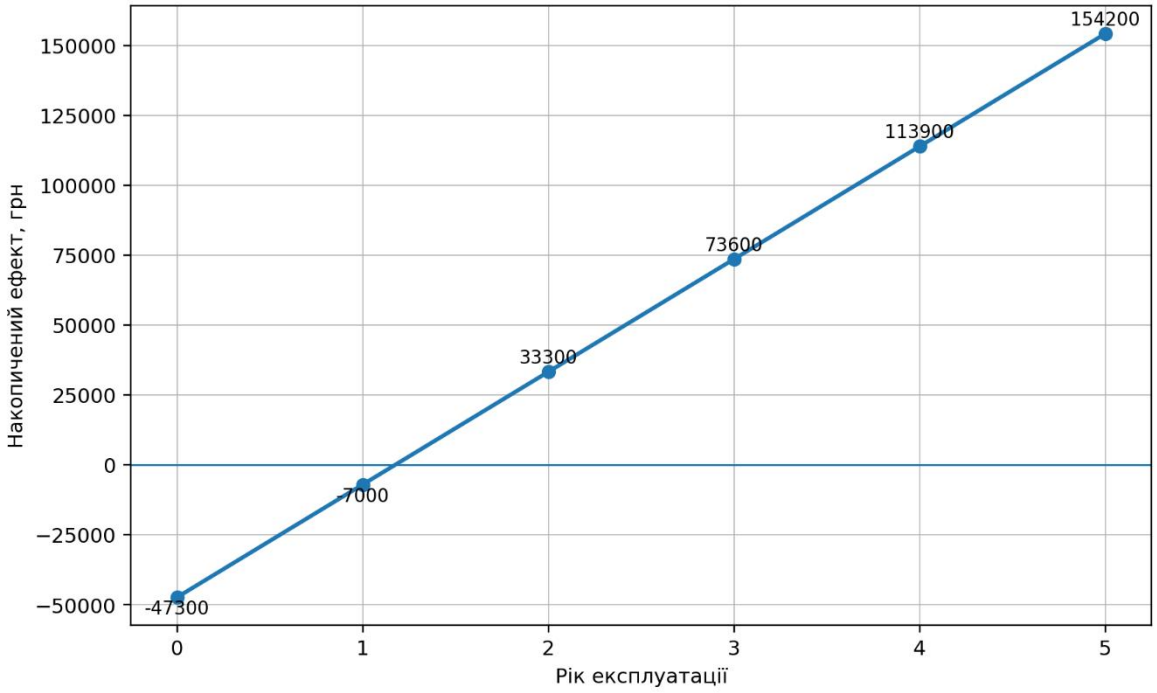


Рисунок 4.3 – Накопичений економічний ефект за роками експлуатації

З графіка видно, що вже після першого року експлуатації основна частина капітальних витрат компенсується, а протягом другого року система переходить у зону чистого прибутку. За п’ять років експлуатації накопичений економічний ефект становить близько 154200 грн.

4.12 Аналіз чутливості строку окупності

Оскільки економічний ефект значною мірою залежить від зменшення витрати пального, доцільно проаналізувати, як змінюється строк окупності при різному рівні паливної економії. Для аналізу приймаємо діапазон зниження витрати пального від 3 % до 8 %.

Таблиця 4.3 – Залежність строку окупності від економії пального

Зниження витрати пального, %	Строк окупності, років
3	1,61
4	1,36
5	1,17
6	1,03
7	0,91
8	0,82
Зниження витрати пального, %	Строк окупності, років
3	1,61

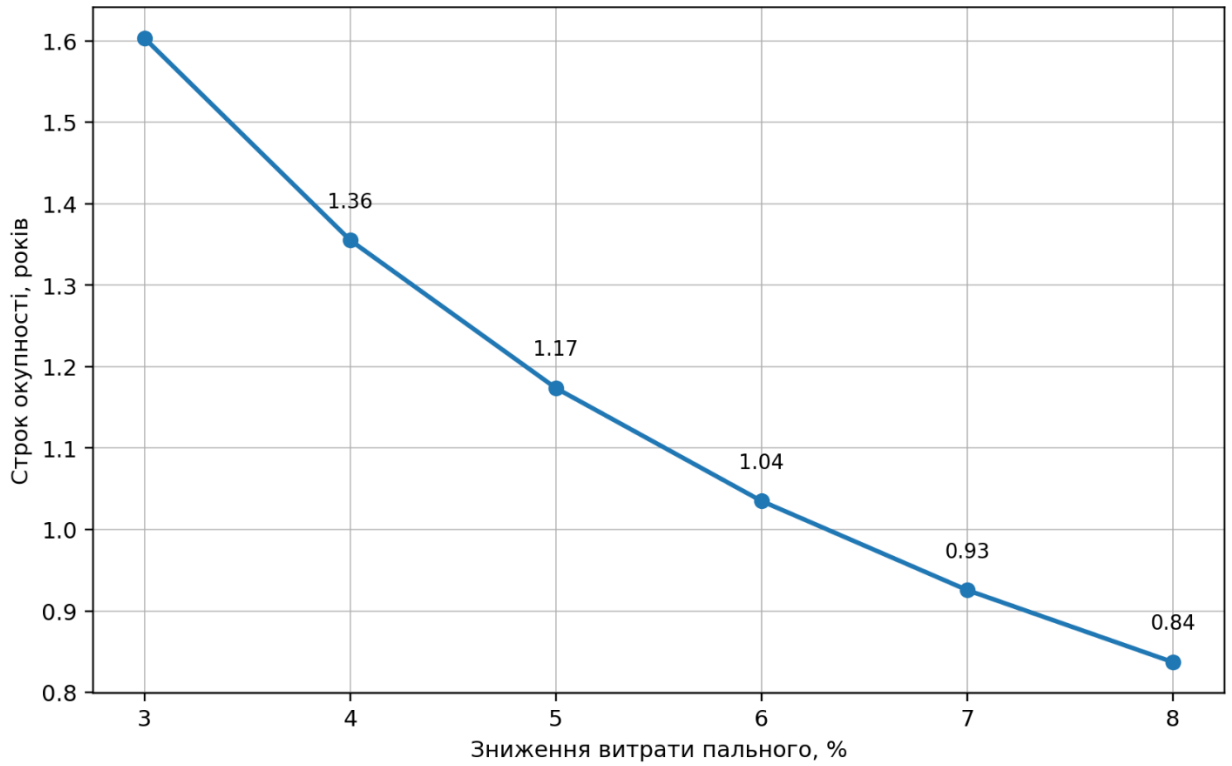


Рисунок 4.4 – Чутливість строку окупності до економії пального

Аналіз показує, що навіть при відносно невеликому зниженні витрати пального на 3 % строк окупності становить близько 1,61 року. Якщо економія пального зростає до 6–8 %, строк окупності скорочується до 0,82–1,03 року. Це підтверджує, що ефективність системи найбільше залежить від інтенсивності використання техніки та фактичного зниження витрат пального.

ВИСНОВОК

У дипломній роботі розглянуто питання підвищення експлуатаційних характеристик колісної автотракторної техніки шляхом розробки автоматизованої системи контролю та підтримання тиску в шинах. Актуальність теми обумовлена тим, що тиск у шинах безпосередньо впливає на тягово-зчіпні властивості машини, витрату пального, зношування шин, ущільнення ґрунту, стійкість руху та загальну безпеку експлуатації.

У першому розділі виконано огляд відомих технічних рішень систем підтримання тиску в шинах транспортних засобів. Розглянуто пасивні й активні системи контролю тиску, системи автоматичного підкачування, централізовані системи регулювання тиску та комбіновані інтелектуальні рішення. Встановлено, що для автотракторної техніки найбільш доцільним є застосування системи, яка не лише контролює тиск, а й автоматично підтримує його відповідно до умов руху та режиму роботи.

У другому розділі обґрунтовано конструкторсько-технологічне рішення автоматизованої системи. Запропоновано модернізований клапанний вузол, у якому керуючий тиск подається не постійно, а лише в момент підкачування або стравлювання повітря. Такий принцип роботи дозволяє зменшити втрати повітря через рухомі з’єднання, скоротити навантаження на компресор і підвищити надійність пневматичної системи.

Виконано розрахунок площі дроселюючої щілини та встановлено, що при діаметрі $d = 10$ мм і відкритті $h = 0{,}5$ мм площа прохідного перерізу становить 15,7 мм². За цих параметрів час наповнення шин об’ємом 0,05 м³, 0,07 м³ і 0,1 м³ становить відповідно приблизно 4,04 с, 5,65 с і 8,07 с. Порівняння часу наповнення з часом падіння тиску при умовному пошкодженні шини підтвердило, що вибрані параметри клапана забезпечують можливість компенсації втрати тиску.

Також у межах конструкторсько-технологічного розділу розглянуто виготовлення деталі «Гвинт», яка входить до складу клапана регулювання тиску. Для її виготовлення обрано круглий пруток із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т діаметром 14 мм. Розраховано, що для партії з 1000 деталей потрібно 11 прутків, а загальний час виготовлення партії становить 56,5 год. Орієнтовна вартість виготовлення партії деталей становить 4254 EUR.

У третьому розділі розглянуто питання охорони праці під час експлуатації,

технічного обслуговування та ремонту автоматизованої системи контролю тиску. Визначено основні небезпечні фактори: робота з пневматичною системою під тиском, шиномонтажні операції, електричні кола керування, рухомі частини машини та пожежна небезпека. Запропоновано заходи безпеки, зокрема використання запобіжних клапанів, захист пневматичних магістралей, аварійне відключення системи, контроль герметичності та дотримання правил безпечного обслуговування шин.

У четвертому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження системи. Встановлено, що орієнтовні капітальні витрати на встановлення автоматизованої системи становлять 47300 грн. Річний економічний ефект від зменшення витрати пального, зниження зношування шин, скорочення простоїв і економії часу становить 45300 грн/рік. З урахуванням витрат на технічне обслуговування чистий річний економічний ефект дорівнює 40300 грн/рік.

Строк окупності запропонованої системи становить 1,17 року, що підтверджує економічну доцільність її впровадження. Отже, розроблена автоматизована система контролю та підтримання тиску в шинах дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики колісної автотракторної техніки, зменшити витрати на експлуатацію, підвищити безпеку руху та забезпечити кращу адаптацію машини до різних умов роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гевко Б. М., Ляшук О. Л., Пастернак М. Г. Технологічні основи машинобудування : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2017. 276 с.

2. Кравчук В. І., Погорілий Л. В., Погоріла В. В. Сільськогосподарська техніка: основи теорії та розрахунку : навч. посіб. Київ : Аграрна наука, 2019. 432 с.

3. Надикто В. Т. Основи агрегатування модульних енергетичних засобів. Мелітополь : ТДАТУ, 2018. 240 с.

4. Гідравліка, пневматика та гідропневмопривод : навч. посіб. / О. М. Герасименко, В. І. Кравчук, С. П. Бондар. Київ : Центр учбової літератури, 2020. 312 с.

5. Автомобілі. Теорія експлуатаційних властивостей : навч. посіб. / В. П. Волков, В. М. Більченко, О. Б. Бутенко. Харків : ХНАДУ, 2018. 292 с.

6. Системи автоматичного керування технічними об’єктами : навч. посіб. / В. П. Лисенко, А. О. Ладанюк, Р. М. Рудницький. Київ : НУБіП України, 2021. 268 с. НПАОП 0.00-1.62-12. Правила охорони праці на автомобільному транспорті. Київ, 2012.

7. НПАОП 0.00-1.71-13. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями. Київ, 2013.

8. Правила пожежної безпеки в Україні : наказ МВС України від 30.12.2014 № 1417. Київ, 2015.

9. UNECE Regulation No. 141. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to Tyre Pressure Monitoring Systems. Geneva : United Nations Economic Commission for Europe, 2017.

10. UNECE Regulation No. 141. Tyre Pressure Monitoring System amendments. Geneva : United Nations Economic Commission for Europe, 2025.

11. Michelin. New MICHELIN EVOBIB agricultural tire. Clermont-Ferrand : Michelin, 2023.

12. Michelin. MICHELIN EVOBIB Tire: technical and application information. Michelin North America, 2024.

13. PTG Reifendruckregelsysteme. Central tyre inflation systems for agricultural vehicles: benefits and operating principles. Neuss, Germany, 2024.

14. TerraCare. Tire pressure control technology for tractors and trailers: concept and practical benefits. Austria, 2024.

15. Adams B. T., Reid J. F., Hummel J. W. Effects of central tire inflation systems on ride quality of agricultural vehicles. Journal of Terramechanics. 2004. Vol. 41. P. 199–213.

16. Schreiber M., Kutzbach H. D. Influence of tire inflation pressure on traction and soil compaction. Agricultural Engineering International. 2008. Vol. 10. P. 1–12.

17. Febo P., Pessina D. Soil compaction and traction performance of agricultural tractors under different tire inflation pressures. Biosystems Engineering. 2015. Vol. 136. P. 57–66.

18. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. 4th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. 560 p.

19. Reimpell J., Stoll H., Betzler J. The Automotive Chassis: Engineering Principles. 2nd ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2001. 456 p.

20. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale : SAE International, 1992. 495 p.

21. Heißing B., Ersoy M., Gies S. Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2011. 611 p.