

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕННЯ «МАГІСТР»
НА ТЕМУ:

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ
ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ / AUTOMATED SYSTEM FOR
MANAGING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF ASPHALT

Виконав студент групи АКІТм-21
Сорока Ю.П.
Науковий керівник к.т.н., доц.
ГУМЕННИЙ П.В.

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "магістр"
спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри СКС

А.І.Сегін

“ ” 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Сорока Юрій Петрович

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Автоматизована система управління технологічним процесом вкладання асфальту / Automated System for Managing the Technological Process of Asphalt Paving керівник роботи к.т.н., Гуменний П.В.

затверджені наказом по університету від ”12” грудня 2023 р. №753.

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи

15 листопада 2024р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Апаратно-програмних засобів, що використовуються в технологічному процесі вкладання асфальту

1.1. Інтелектуальні засоби керування, що впливають на геометричну рівність асфальтного полотна

1.2. Технологією гарячої регенерації дорожнього полотна

2. Технічні засоби управління контролю параметрів вкладання асфальту

2.1. Пристрої управління системою вкладання асфальту

2.2. Система вкладання асфальту

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз робочого процесу асфальтоукладача для визначення ключових параметрів керування.
2. Розробку функціональної схеми системи керування робочим органом асфальтоукладача.
3. Синтез параметрів аналогового, цифрового та нечіткого ПІ-регулятора для покращення характеристик керування.
4. Проведення комп'ютерного моделювання системи керування в обґрунтованих діапазонах змінних.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Імітаційна модель для керування робочим механізмом асфальтоукладача, що використовує цифровий та нечіткий пі-регулятором

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	П.В. Гуменний к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 12 грудня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	АНАЛІЗ ВПЛИВУ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ НА ЕКНОМІКУ	12.2023р. – 02.2024р.	
2	ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА НОВІТНІХ МЕТОДІВ ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ	03.2024р. – 06.2024р.	
3	РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ	07.2024р. – 11.2024р.	

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Сорока Ю.П.

к.т.н., Гуменний П.В.

АНОТАЦІЯ

Сорока Ю. П. Автоматизована система управління технологічним процесом вкладання асфальту. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Західноукраїнський національний університет. Тернопіль, 2024.

У роботі розкрито засоби робочого процесу асфальтоукладача для визначення ключових параметрів керування; функціональна схеми системи керування робочим органом асфальтоукладача; синтез параметрів аналогового, цифрового та нечіткого ПІ-регулятора для покращення характеристик керування процесом вкладання асфальту; реалізація імітаційних моделей аналогової, цифрової та нечіткої системи керування у середовищі MATLAB&Simulink.

ANOTATION

Soroka Y. P. Automated System for Managing the Technological Process of Asphalt Paving. – Manuscript.

Research for obtaining the Master's degree in the specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies, and Robotics", educational-professional program "Automation and Computer-Integrated Technologies" – Western Ukrainian National University, Ternopil, 2024.

This work reveals the means of the working process of the asphalt paver to determine key control parameters; the functional diagram of the control system for the working mechanism of the asphalt paver; the synthesis of parameters for analog, digital, and fuzzy PI-regulators to improve the control characteristics of the asphalt paving process; implementation of simulation models of the analog, digital, and fuzzy control systems in the MATLAB&Simulink environment.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ НА ЕКОНОМІКУ	12
1.1 Аналіз впливу дорожньої інфраструктури на економічні процеси в Україні та світі	12
1.2 Аналіз систем управління технологічним процесом вкладання асфальту	17
1.3 Аналіз особливостей проведення швидкої заміни асфальтобетону технологією гарячої регенерації.....	27
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА НОВІТНІХ МЕТОДІВ ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ.....	33
2.1 Дослідження апаратно-програмних засобів,що використовуються в технологічному процесі вкладання асфальту...	33
2.2 Дослідження інтелектуальних засобів керування, що впливають на геометричну рівність асфальтного полотна	41
2.3 Дослідження ролі температурного режиму вкладання асфальту на якість дорожнього полотна	51
3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ.....	56
3.1 Розрахунок параметрів гідравлічної схеми асфальтоукладача ...	56
3.2 Розробка імітаційної моделі аналогового та цифрового ПІ- регулятора системи керування асфальтоукладчика	62
3.3 Розробка нейрон-нечіткої моделі регулятора параметрів технологічного процесу вкладання асфальту	69
ВИСНОВКИ	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77

ДОДАТОК А. ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОБОЧИМ
МЕХАНІЗМОМ АСФАЛЬТОУКЛАДАЧА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ
ЦИФРОВИЙ ТА НЕЧІТКИЙ ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ

80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ –автоматизована система управління

МК – мікроконтролер

АЛБ- арифметико-логічний блок

ВДП- верхнє дорожнє покриття

КНА - Компресійно-нівелювальний агрегат

ВСТУП

Актуальність теми Забезпечення якісного та ефективного виконання дорожніх робіт є одним із пріоритетів сучасного будівництва, особливо в умовах розширення транспортної інфраструктури. Процес вкладання асфальту вимагає точного контролю параметрів роботи, щоб досягти необхідної рівності, товщини та однорідності дорожнього покриття. У цьому контексті розробка автоматизованих систем керування асфальтоукладачем є актуальним завданням для підвищення якості та продуктивності будівельних робіт. Це зумовлено потребою у вдосконаленні процесу автоматизованого керування асфальтоукладачем, що сприятиме зменшенню людського впливу, покращенню якості дорожнього покриття та оптимізації витрат на будівельні роботи. Досягнення стабільної роботи асфальтоукладача незалежно від зовнішніх збурень дозволяє значно підвищити ефективність та якість асфальтобетонних робіт.

Мета кваліфікаційної роботи. Розробити автоматизованої системи керування процесом вкладання асфальту, що забезпечує стабільну роботу виконавчих органів асфальтоукладача за різних умов експлуатації та зовнішніх збурень.

Досягнення поставленої мети потрібно реалізувати наступні завдання:

1. Аналіз робочого процесу асфальтоукладача для визначення ключових параметрів керування.
2. Розробку функціональної схеми системи керування робочим органом асфальтоукладача.
3. Синтез параметрів аналогового, цифрового та нечіткого ПІ-регулятора для покращення характеристик керування.
4. Розробку імітаційних моделей аналогової, цифрової та нечіткої системи керування у середовищі MATLAB&Simulink.
5. Проведення комп'ютерного моделювання системи керування в обґрунтованих діапазонах змінних.

Об'єктом дослідження є система автоматизованого керування процесом вкладання асфальту за допомогою асфальтоукладача.

Предметом дослідження виступає автоматизована система керування робочими органами асфальтоукладача, що відповідає за стабільну роботу обладнання при зовнішніх збуреннях.

Методологія наукового дослідження. Ґрунтується на комплексному підході до розробки та аналізу автоматизованої системи керування процесом вкладання асфальту. У процесі дослідження були використані методи теоретичного аналізу, комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження, що дозволило забезпечити достовірність отриманих результатів та адекватність запропонованої системи керування.

Наукова новизна дослідження. Полягає у розробці і аналізі автоматизованої системи керування робочими органами асфальтоукладача на основі комплексного підходу до синтезу параметрів аналогового, цифрового та нечіткого ПІ-регулятора. Запропоноване рішення дозволяє досягти стабільної роботи гідравлічного приводу, практично незалежної від основних зовнішніх збурень.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені для кваліфікаційної роботи структурні рішення, алгоритми керування та їх реалізація можуть бути використані при реалізації автоматизованої системи управління асфальтоукладачем при вкладанні асфальту.

Подальші напрямки наукового дослідження можуть включати розробку інтелектуальних систем керування асфальтоукладачем із застосуванням методів машинного навчання, що здатні адаптувати параметри керування залежно від умов експлуатації, а також впровадження системи в реальні будівельні процеси для практичної оцінки її ефективності.

Апробація. Сорока Ю.П. Розробка імітаційної моделі керування інформаційно-вимірювальною системою цукрового виробництва / П.В. Гуменний, А.С. Гриців, Б.В. Романюк, Ю.П. Сорока //Інноваційні підходи до

розвитку технологій та економіки IADTE 2024. – Сваліява. – ЗУНУ – Червень 27, 2024. –с. 79-82.

Сорока Ю.П. Автоматизована система управління технологічним процесом вкладання асфальту / П.В. Гуменний, А.С. Гриців, Б.В. Романюк, Ю.П. Сорока //Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму «Технології Інтернету речей: системи та рішення» (ТІР СТ - 2024), Тернопіль, 2024. - с.14-19.

Сорока Ю.П. Комп'ютерно-інтегрована система енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії / А.С. Гриців, Б.В. Романюк, Ю.П. Сорока //Збірник матеріалів науково-практичного симпозіуму «Технології Інтернету речей: системи та рішення» (ТІР СТ - 2024), Тернопіль, 2024. - с.53-56.

1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ НА ЕКОНОМІКУ

1.1 Аналіз впливу дорожньої інфраструктури на економічні процеси в Україні та світі

Дорожня інфраструктура відіграє «одну з ключових ролей у соціально-економічному розвитку країн, забезпечуючи ефективний транспортний зв'язок між регіонами та країнами. Високоякісна асфальтова дорожня мережа, зокрема, дозволяє значно скоротити витрати часу на транспортування, знизити логістичні витрати для бізнесу та сприяти зростанню внутрішнього та міжнародного товарообміну. У сучасному глобалізованому світі економічний вплив дорожньої інфраструктури стає особливо важливим, адже саме від неї залежить швидкість і вартість доставки товарів, а також мобільність населення» [1].

Якісна «дорожня інфраструктура позитивно впливає на економічні процеси з кількох основних причин:

1. Зниження транспортних витрат. Якісне дорожнє покриття скорочує витрати на обслуговування транспортних засобів, зменшує зношуваність техніки та знижує витрати на паливо через зменшення простоїв і покращення умов руху. За дослідженнями Світового банку, інвестиції в інфраструктуру призводять до зростання економіки, оскільки зниження витрат на логістику робить економіку більш конкурентоспроможною.

2. Підвищення мобільності населення та покращення якості життя. Якісні дороги сприяють доступу населення до робочих місць, освітніх та медичних закладів, підвищують мобільність і зменшують час на дорогу. Такий підхід веде до зростання професійного потенціалу працівників та покращення ефективності їхньої діяльності.

3. Країни з розвинуеною дорожньою інфраструктурою приваблюють іноземних інвесторів, які оцінюють зручність логістичних маршрутів як один із ключових факторів для інвестицій. Хороша інфраструктура сприяє відкриттю нових підприємств, що створює робочі місця та стимулює економічну активність.

4. Дорожня інфраструктура сприяє зростанню товарообігу як на внутрішньому, так і на міжнародному рівнях. Вона є важливим чинником для інтеграції країн в глобальну економіку, сприяючи участі в міжнародних торгових мережах і спрощенню доступу до зовнішніх ринків» [1].

Розвинені країни, такі як «США, Китай, та країни Європи активно інвестують в якісну дорожню мережу та мають високі економічні показники, частково завдяки цьому. На рисунку 1.1 представлено графік фінансування на автомобільні дороги для Європи,США, Китаю та України» [2].

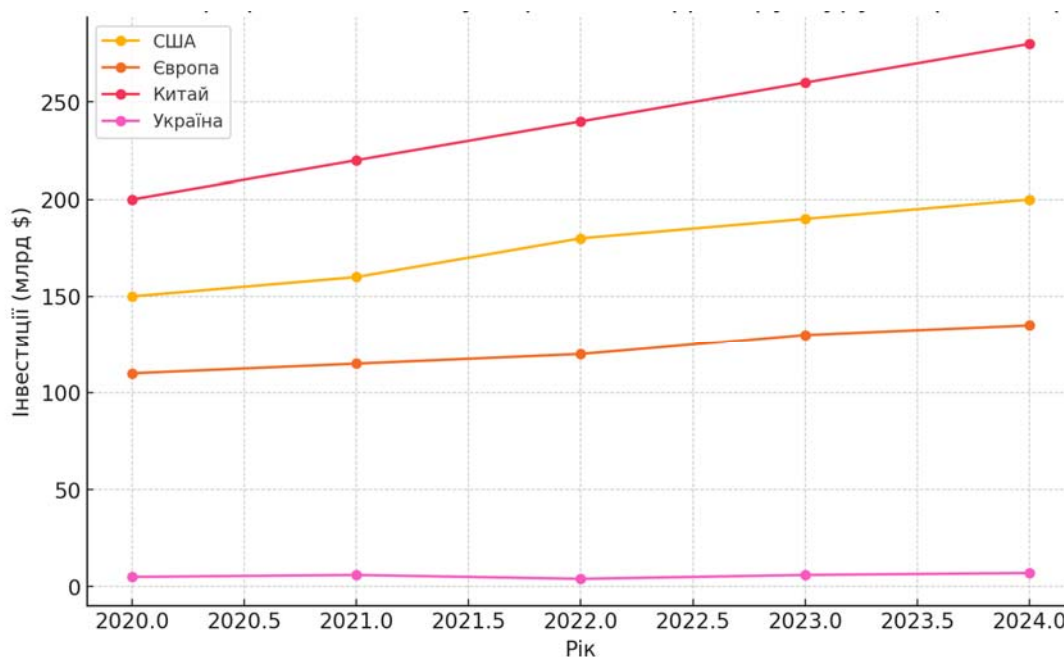


Рисунок 1.1 – Графік фінансування дорожньої інфраструктури.

Згідно з дослідженнями, «значні інвестиції в дорожню інфраструктуру допомогли США створити єдину транспортну мережу, яка зв’язує країну від східного до західного узбережжя, що значно знижує витрати на перевезення товарів і стимулює економічний розвиток» [2].

Відома система «автобанів у Німеччині та країнах західної Європи забезпечує швидке і якісне сполучення між містами, що значно покращує мобільність населення та ефективність промислових і логістичних процесів. Це дозволило Європі досягти високого рівня економічної інтеграції та стати одним з найбільших експортерів у світі.

У рамках стратегії «Один пояс, один шлях» країна з найбільшою економікою сходу Китай активно розвиває як внутрішню дорожню інфраструктуру, так і транспортні коридори для покращення зв'язків з іншими країнами. Ця стратегія сприяє створенню нових логістичних маршрутів, які дозволяють Китаю знизити витрати на транспортування товарів до Європи та Африки» [2].

Географічне положення України як сполучної ланки між Європою та Азією відкриває широкі перспективи для вдосконалення транспортного сектору країни. Поліпшення дорожньої мережі в Україні може дати відчутний економічний ефект, зокрема:

Якісна дорожня «інфраструктура дозволить знизити витрати на доставку товарів між регіонами, що сприятиме економічній активності всередині країни. Це особливо актуально для агропромислового сектора, який потребує швидкого і надійного транспортування продукції. Світова економіка за останні десятиліття демонструє стабільне зростання обсягів вантажоперевезень автомобільним транспортом. Це пов'язано зі збільшенням обсягів виробництва, зростанням рівня споживання, розвитком міжнародної торгівлі, а також з розширенням інфраструктури та доступністю автомобільного транспорту для бізнесу. Глобалізація та міжнародна інтеграція економік сприяли інтенсифікації торгових зв'язків між різними країнами та регіонами. Як результат, міжнародний автомобільний транспорт став основним засобом доставки вантажів на короткі та середні відстані.

Зниження витрат на доставку товарів сприяють їх збільшенню, відповідно ми бачимо згідно рисунку 1.2. про зростання кількості вантажоперевезень автоабільними дорогами в Україна та світі» [3].

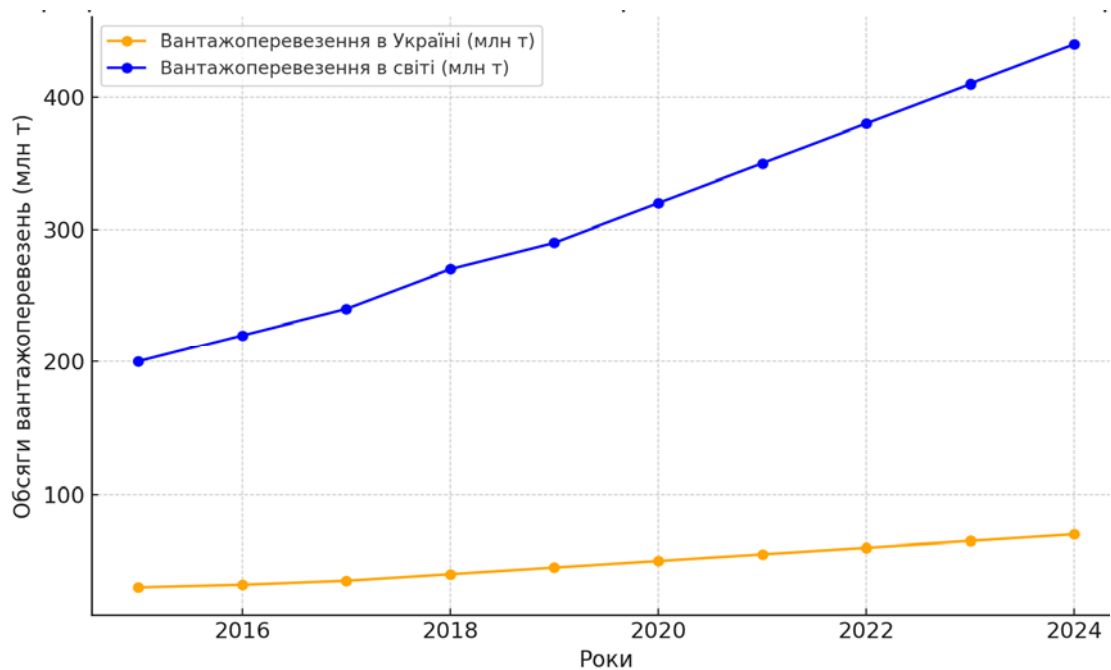


Рисунок 1.2 Графік зростання кількості вантажних перевезень автомобільними доргами в Україні та світі

Основними факторами, «що сприяють зростанню вантажоперевезень автомобільним транспортом у світі, є:

1. Зростання попиту на продукцію. У міру розвитку економіки попит на різні товари, включаючи сировинні матеріали, товари промислового та сільськогосподарського призначення, а також споживчі товари, збільшується, що вимагає розширення логістичних мереж.

2. Технологічний розвиток. Впровадження сучасних технологій (навігаційних систем, онлайн-маршрутизації, систем контролю вантажу) значно підвищує ефективність перевезень та знижує витрати.

3. Урбанізація та розвиток інфраструктури. Зростання міського населення створює потребу в перевезенні товарів на короткі відстані. Інвестиції в дороги, мостові переходи, сучасні розв'язки та інші елементи інфраструктури роблять вантажоперевезення автомобільним транспортом привабливішими.

4. Гнучкість автомобільного транспорту. На відміну від залізничного чи морського транспорту, автомобільний є найбільш гнучким та

дозволяє доставляти вантажі до будь-яких місць з відповідною інфраструктурою» [4].

Обсяги автомобільних та залізничних «вантажоперевезень в Україні за останні 10 років значно коливались через економічні чинники, зміну інфраструктури та вплив війни. До 2022 року обсяг перевезень стабільно зростав, однак з початком війни значно знизився через блокування портів, пошкодження залізничної інфраструктури та обмеження у логістичних коридорах.

До 2021 року залізничні перевезення досягли піку у 314,3 млн тонн, але у 2022 році впали на 52%, до 150 млн тонн. Автомобільні перевезення також скоротилися на 22%, до 175 млн тонн. Загалом, вантажні перевезення у 2022 році зменшилися майже вдвічі порівняно з 2021 роком (317 млн тонн у порівнянні з понад 600 млн тонн у довоєнні роки) через бойові дії та блокування морських портів» [3].

На початку 2024 року обсяги «залізничних перевезень почали поступово відновлюватися завдяки розвитку нових експортних маршрутів та частковому розблокуванню портів. Прогноз на 2024 рік передбачає збільшення залізничних перевезень до 152 млн тонн, а також активні капіталовкладення у розвиток інфраструктури, зокрема прикордонних переходів для покращення логістичних можливостей, що представлено на рисунку 1.3» [4].

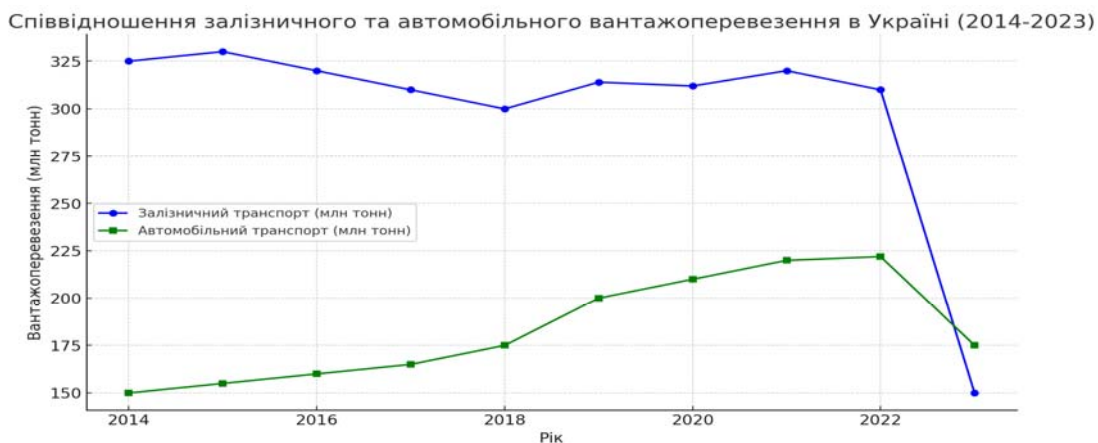


Рисунок 1.3 Співвідношення залізничних вантажних перевезень і дорожніх

За умов якісної дорожньої інфраструктури Україна може стати привабливішою для іноземних компаній, які потребують стабільного логістичного ланцюга для експорту продукції до Європи.

Якісні дороги підвищують доступність туристичних об'єктів, сприяють зростанню туристичних потоків і стимулюють розвиток місцевого бізнесу, пов'язаного з туризмом.

Зниження витрат на транспортування продукції дозволить зменшити собівартість українських товарів і підвищити їх конкурентоспроможність на міжнародних ринках.

Отже, якісна асфальтова дорожня інфраструктура значно впливає на економічний розвиток як на національному, так і на міжнародному рівнях. Розвинені країни вже давно впроваджують та розширюють свої транспортні мережі, забезпечуючи стабільний економічний ріст, залучення інвестицій та високу мобільність населення. Для України, з її стратегічним географічним положенням, розвиток дорожньої інфраструктури є не тільки економічно доцільним, а й стратегічно важливим для інтеграції в світову економіку та забезпечення стійкого економічного зростання.

1.2 Аналіз систем управління технологічним процесом вкладання асфальту

В умовах «активного розвитку дорожньої інфраструктури в Україні уряд щороку виділяє значні кошти на будівництво та капітальний ремонт доріг. Зокрема, за останні роки обсяг фінансування цієї сфери суттєво зріс, що стало можливим завдяки реалізації таких ініціатив, як програма "Велике будівництво", метою якої є забезпечення якісних і сучасних доріг по всій країні. Як відомо, вартість будівництва доріг в Україні значною мірою залежить від їхньої категорії та інших супутніх факторів. Так, за даними агентства "Укравтодор", у 2020 році середня вартість спорудження одного кілометра автошляху першої категорії з асфальтобетонним покриттям

становила кругленьку суму – 170,6 мільйонів гривень. Для порівняння, будівництво аналогічного відрізка дороги другої, третьої, четвертої та п'ятої категорій обходилося державному бюджету відповідно у 77,4 млн грн, 69,6 млн грн, 39,4 млн грн та 11,3 млн грн (рисунок 1.4)» [5].



Рисунок 1.4. Вартість 1 км дороги в Україні станом на 2020 рік

Варто зазначити, що ремонт існуючих доріг також є досить коштовною процедурою. Зокрема, оновлення одного кілометра автомагістралі першої категорії може обійтися приблизно у 60 мільйонів гривень, а реконструкція – і поготів, досягаючи позначки у 100 мільйонів.

Структура «витрат на дорожньо-будівельні роботи є досить стабільною і, як правило, включає такі основні складові: вартість матеріалів (близько 60% загальної суми), витрати на експлуатацію техніки (20%), заробітну плату працівників (10%) та інші супутні витрати (10%) (рисунок 1.5)» [4].

Структура витрат на дорожньо-будівельні роботи

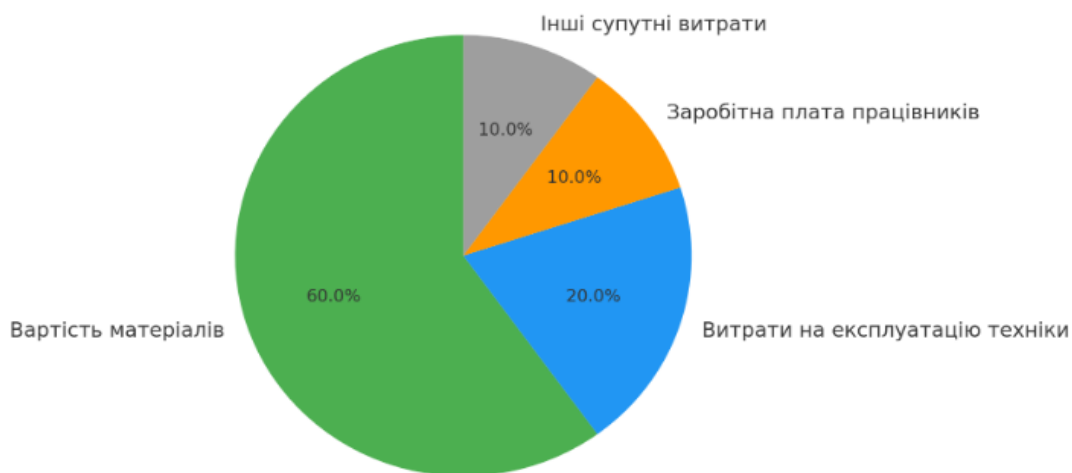


Рисунок 1.5. Структура витрат на дорожньо-будівельні роботи

Цікавим є порівняння вартості дорожнього будівництва в Україні з іншими країнами. Наприклад, «за даними 2021 року, будівництво одного кілометра односмугової дороги в США коштувало близько 10,3 мільйонів доларів, у Канаді – 8,7 мільйонів доларів, у Китаї – 2,2 мільйони доларів, а в Німеччині – 9,2 мільйони доларів. Очевидно, що вартість таких робіт значною мірою залежить від рівня розвитку країни, її економічних можливостей та географічних особливостей (рисунок 1.6)» [6].

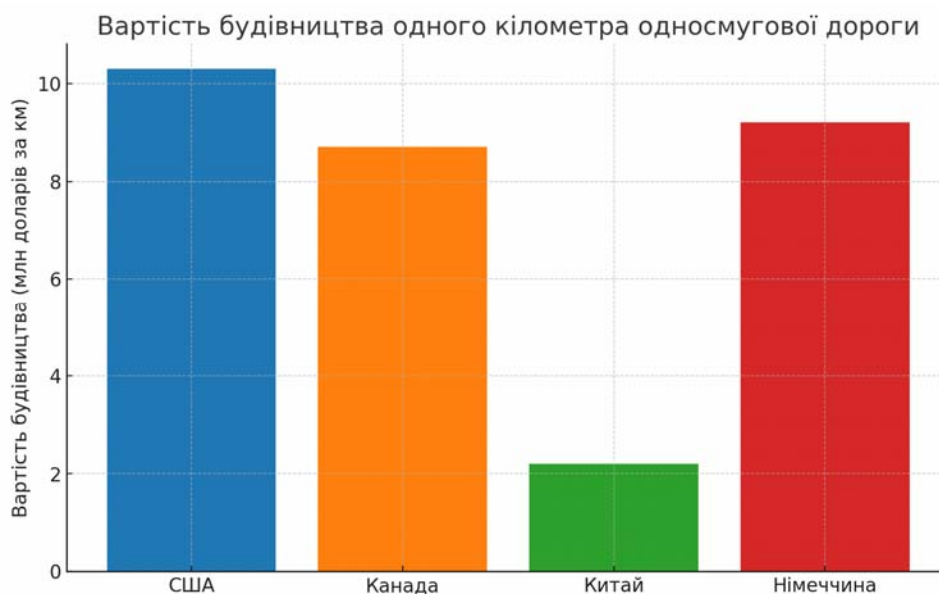


Рисунок 1.6. Вартість будівництва одного кілометра доріг у світі

Незважаючи на високий рівень інвестицій, ефективність їхнього використання залишається важливим питанням, оскільки в Україні нерідко фіксуються випадки нецільового або недоброчесного витрачання коштів на будівництво та ремонт доріг. Це призводить до невиправданих витрат, а також до низької якості виконаних робіт, що в свою чергу знижує довговічність дорожнього покриття та підвищує витрати на його підтримку в належному стані.

У зв'язку з цим актуальною є розробка та впровадження сучасних систем управління технологічними процесами вкладання асфальту, які б дозволили підвищити прозорість використання коштів та забезпечити суворий контроль якості на всіх етапах. Ефективні системи управління здатні не лише оптимізувати роботу обладнання та зменшити ризик відхилень від технологічних норм, але й значно підвищити продуктивність та якість виконаних робіт, що з часом призведе до економії бюджетних коштів і підвищення рівня довіри з боку громадян.

Таким чином, дослідження систем управління технологічним процесом вкладання асфальту є необхідним для поліпшення якості доріг в Україні та забезпечення раціонального використання державних коштів на інфраструктурні проекти.

Асфальтування дороги є багатоступеневим процесом, що складається з чітко регламентованих етапів, спрямованих на досягнення стійкого, довговічного та безпечного дорожнього покриття. Якість кінцевого результату визначається як ретельним плануванням робіт, так і правильним виконанням кожного етапу технологічного процесу. Досягнення високої якості асфальтування є неможливим без попереднього проектування, обліку природних і технічних умов ділянки, а також використання сучасної спецтехніки.

Етап «проектування має на меті визначення обсягу робіт і необхідної кількості матеріалів, що дозволяє точно розрахувати кошторис. Основними параметрами, які враховуються при проектуванні, є Габаритні розміри

ділянки, що дозволяють визначити загальний обсяг необхідних робіт. При проектуванні враховується рельєф, що дозволяє уникнути проблем із дренажем і забезпечує рівномірний розподіл навантажень на дорожнє покриття. Оцінка стану ґрунту та рівня підземних вод дозволяє вибрати оптимальні матеріали для дорожньої основи. Врахування інженерних комунікацій і розташування дорожніх елементів (бордюрів, дренажних систем) сприяє продовженню терміну служби дороги. Проектна документація містить кошторис робіт, специфікацію матеріалів і рекомендації щодо їхнього використання» [7].

Підготовка ділянки для асфальтування є одним із найбільш трудомістких етапів. Вона передбачає низку операцій, спрямованих на підготовку поверхні до укладання асфальту. На початковому етапі відбувається видалення старого покриття. Наступний етап це Зняття верхнього шару ґрунту, за допомогою використання бульдозерів і екскаваторів що, забезпечить доступ до нижніх, більш стабільних шарів. Грейдери вирівнюють ділянку, створюючи базу для укладання основи. Наступний етап нанесення позначок і формування дорожнього корита. Це визначає рівень дорожнього полотна та точні межі ділянки асфальтування. Цей процес є важливим для уникнення просідання покриття в майбутньому.

Після підготовки ділянки «здійснюється формування основи дороги. Даний етап включає такі підпроцеси:

- насипання шарів матеріалу. Спершу формується «дорожня подушка», що складається з шару піску або піщано-гравійної суміші, поверх якого насипають шар щебеню різних фракцій.
- утрамбування та вирівнювання. Кожен шар ретельно вирівнюється і утрамбовується, щоб уникнути утворення порожнин.
- проливання бітумом. Бітум дозволяє підвищити зчеплення шарів та їх стійкість до навантажень.
- встановлення бортового каменю. Бортовий камінь обмежує краї дорожнього полотна та забезпечує його стійкість (рисунок 1.7)» [8].



Рисунок 1.7- Шарування дорожнього полотна

Процес вкладання асфальту виконується в наступні послідовності: асфальтобетонна суміш доставляється на місце укладання самоскидами. У деяких випадках застосовуються спеціальні машини для доставки гарячої асфальтової суміші. Асфальтобетоноукладчики розподіляють суміш по поверхні, забезпечуючи рівномірне покриття. Після розподілу асфальту по ділянці спеціальні котки ущільнюють поверхню до потрібної щільності, що запобігає утворенню тріщин

Технічний контроль дозволяє забезпечити якість і довговічність дорожнього покриття. Спеціалісти перевіряють рівність поверхні та відсутність дефектів, таких як тріщини. Використовуються інструменти для перевірки товщини та рівності покриття. Аналіз зразків асфальту дозволяє перевірити його міцність, стійкість до деформацій і здатність витримувати навантаження.

На кожному з етапів асфальтування використовуються різні види спецтехніки, від екскаваторів і навантажувачів до асфальтобетоноукладчиків і котків. Їх застосування дозволяє не лише прискорити роботи, а й покращити їхню якість. Застосування широкого спектра техніки дає можливість

виконувати кожен етап з максимальною точністю, що впливає на довговічність і стійкість дорожнього покриття (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8- Процес вкладання асфальту асфальтоукладачем

Процес асфальтування дороги є багатокомпонентним і вимагає ретельного виконання всіх етапів, починаючи від проектування і завершуючи технічним контролем. Від правильного дотримання технологічних стандартів та використання спеціальної техніки залежить не лише довговічність дорожнього покриття, а й його безпечність для кінцевих користувачів.

Технологічні комплекси для «укладання асфальту складаються з взаємопов'язаних технічних пристроїв та програмних інструментів, що оптимізують процес будівництва доріг та забезпечують чітке дотримання встановлених параметрів. Основна мета таких систем — забезпечити контроль усіх етапів роботи, від підготовки основи дороги до фінальної укладки та ущільнення асфальту, що дозволяє досягти оптимальної якості покриття при мінімальних затратах ресурсів» [9].

Зазвичай системи управління процесом «укладання асфальту» поділяються на кілька основних компонентів:

1. Система контролю температури асфальтної суміші. Якість асфальтового покриття значною мірою залежить від температури суміші під час укладки. Оптимальна температура дозволяє досягти необхідної щільності та міцності асфальту, а також забезпечує однорідність покриття. Сучасні системи моніторингу використовують інфрачервоні сенсори та теплові камери, які дозволяють фіксувати температурні показники асфальту безпосередньо під час укладання, а відхилення від допустимих значень сигналізуються оператору в режимі реального часу.

2. Системи контролю товщини покриття. Одним з ключових параметрів при укладанні асфальту є товщина шару покриття, оскільки від цього залежить стійкість дороги до навантажень і зносу. Для вимірювання товщини використовуються лазерні датчики або ультразвукові сенсори, які встановлюються на укладальній техніці (асфальтоукладчиках). Вони дозволяють контролювати товщину шару по всій ширині дорожнього полотна, запобігаючи утворенню надлишкових чи недостатніх шарів асфальту.

3. Системи ущільнення та вібраційного контролю. Після укладання асфальтної суміші важливим етапом є її ущільнення, що виконується за допомогою котків. Ущільнення має забезпечити відсутність пустот у матеріалі та його щільне прилягання до поверхні. Системи ущільнення використовують спеціальні сенсори, які контролюють силу вібрації котка та ступінь ущільнення матеріалу, забезпечуючи однорідне ущільнення по всій поверхні дороги.

4. Система контролю якості суміші. До складу асфальтної суміші входять кілька компонентів, таких як бітум, щебінь та пісок, співвідношення яких впливає на довговічність і міцність покриття. Автоматизовані системи контролю зазвичай встановлюються на асфальтозмішувальних установках і дають змогу відстежувати склад суміші та регулювати його відповідно до проєктних вимог.

5. Система GPS-контролю та віддаленого моніторингу. Сучасні технології дозволяють використовувати GPS-контроль для точного визначення положення дорожньої техніки та швидкості її пересування. Ці дані передаються до джерела моніторингу, яка аналізує параметри роботи техніки, забезпечуючи контроль ефективності виконання робіт на кожному етапі.

6. Програмні системи для інтеграції всіх компонентів. Однією з ключових особливостей сучасних систем управління є можливість інтеграції різних компонентів у єдину інформаційну платформу, яка дозволяє централізовано контролювати весь процес укладання асфальту. На основі даних, отриманих від датчиків та інших пристроїв, оператори можуть в режимі реального часу коригувати роботу обладнання, вносити зміни у технологічний процес і приймати оперативні рішення» [6].

Робота систем управління технологічним процесом вкладання асфальту базується на використанні сенсорів і датчиків, які збирають дані про технологічні параметри в режимі реального часу. Ці дані передаються до центрального контролера, де проходить аналіз і обробка. У разі виявлення відхилень від норм або встановлених параметрів система генерує повідомлення для оператора, який може оперативно реагувати на зміни та коригувати роботу техніки.

Взаємодія систем відбувається через мережеві підключення (зазвичай бездротові) або безпосередньо між компонентами. Інформація, отримана від кожної з підсистем, об'єднується в єдину базу даних, що дозволяє мати повний контроль над процесом, фіксувати всі параметри укладання асфальту та зберігати їх для подальшого аналізу. Таким чином, всі підсистеми працюють синхронно, забезпечуючи високу точність та якість виконання робіт.

Застосування таких систем управління не лише підвищує рівень контролю, але й сприяє раціональному використанню матеріалів і ресурсів,

зменшуючи витрати на обслуговування доріг та подовжуючи термін їх експлуатації.

1.3 Аналіз особливостей проведення швидкої заміни асфальтобетону технологією гарячої регенерації

У світовій практиці дорожнього будівництва існує чимала кількість методів швидкого відновлення для дорожнього асфальтобетону. Вибір конкретної технології, безумовно, залежить від особливостей об'єкта, поставлених завдань та наявних температурних умов. Проте варто відзначити, що особливу увагу заслуговують найбільше використовуються для методів, які реалізуються безпосередньо на дорожньому полотні.

Одним із «таких методів є гаряча регенерація (HIR). Це технологія, що передбачає створення гарячих асфальтобетонних сумішей прямо на дорозі шляхом змішування існуючого матеріалу з додатковими компонентами.

Інший чато використовуваний популярний підхід – холодний заміна верхнього дорожнього покриття (CIR). На відміну від гарячої регенерації, тут використовують нижчі температури, а обробка матеріалу здійснюється не на всю глибину асфальтобетонного шару.

Найбільш радикальним методом є всебічна глибока регенерація дорожнього шару асфальту (FDR). Ця технологія передбачає повну переробку існуючого асфальтобетонного шару з використанням матеріалів нижніх шарів покриття.

Базуючись на статистичних даних можна сказати, що застосовувати той чи інший метод при ремонті автомобільного асфальту можна в залежності від стану зношення, що наочно відображено на наступному рисунку 1.10» [9].

Розглянемо технологію гарячої регенерації асфальтобетонного покриття, яка фактично охоплює комплекс різноманітних методів відновлення дорожнього полотна нежорсткого типу. Безсумнівно, ключовою

особливістю цих технологічних рішень виступає послідовність операцій, що передбачає термічну обробку наявного покриття, подальше фрезерування та змішування розігрітих компонентів, а також завершальні етапи – укладання та ущільнення оновленої гарячої суміші безпосередньо на місці проведення робіт (рисунк 1.9).

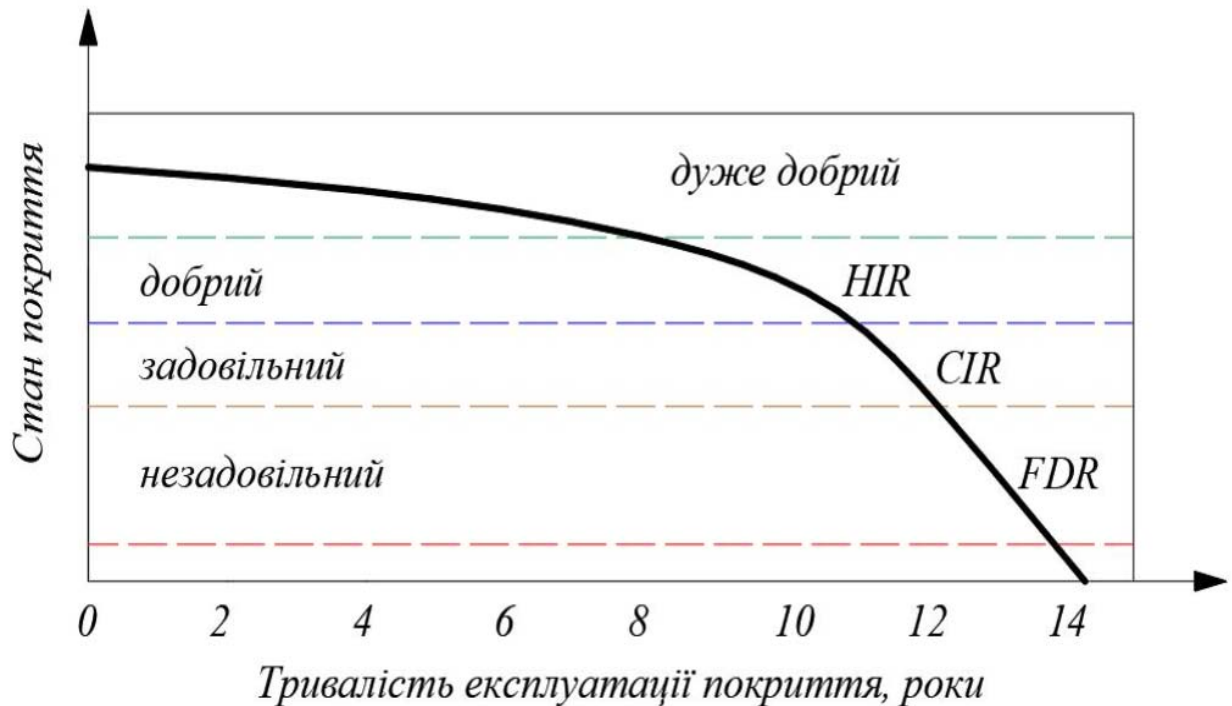


Рисунок 1.9- Особливості використання методів відновлення асфальтного покриття від ступення зношення

Варто відзначити, що застосування технологій гарячої регенерації має низку суттєвих переваг. Передусім, це можливість виконання всього комплексу відновлювальних робіт за допомогою спеціалізованої техніки протягом одного робочого циклу. Крім того, очевидними перевагами є: максимально ефективне використання існуючого асфальтобетонного матеріалу, оптимізація витрат паливних ресурсів завдяки локалізації всіх процесів, включаючи приготування РГС, на ділянці ремонту. Безперечно важливими є також скорочені терміни виконання робіт, можливість збереження руху транспорту по сусідній смузі та гарантована висока якість відновленого покриття.

Інноваційність та економічна доцільність описаної технології полягає, зокрема, у відсутності потреби вивозити та утилізувати відпрацьоване асфальтобетонне покриття, а також у мінімізації використання нових матеріалів для відновлення дорожнього полотна

Аналіз «дослідження дорожнього покриття» показав серйозні порушення цілісності: деформацію у вигляді колій, деградацію верхнього шару, мережу тріщин та втрату зчепних характеристик. Особливо гострою проблемою була розвинена сітка тріщин, що свідчила про значний ступінь деградації матеріалу. Для таких ділянок було передбачено повне видалення пошкоджених шарів асфальтобетону.

За результатами дослідження, застосування технології НІР дозволило не лише відновити експлуатаційні характеристики дорожнього покриття, але й забезпечило значну економію коштів. При цьому було встановлено, що якість регенованого асфальтобетону в значній мірі залежить від властивостей використаного в'язучого елемента для бітуму» [11].

Сучасні «технології гарячої регенерації асфальтобетонного покриття, реалізовані з використанням спеціалізованої техніки німецького виробника Wirtgen, включають декілька методів. Ці методи поділяються на такі основні категорії:

- Метод Reshape: широко використовує профілювання для поверхні.
- Метод Repave: використовує профілювання при цьому з відновленням шару, що досить зносився зносу.
- Технологія Remix передбачає відновлення дорожнього покриття шляхом модифікації компонентного складу використаного асфальтобетону (зазвичай до 20%).
- Технологія Remix Plus, безсумнівно, представляє собою комплексний процес, під час якого, по-перше, відбувається відновлення та модифікація компонентного складу відпрацьованого асфальтобетонного покриття, а по-друге, безперервно здійснюється нанесення свіжого шару асфальтобетонної композиції - все це реалізується за єдиний технологічний цикл.

- Reshape забезпечує не лише ефективне усунення деформацій у вигляді колій на дорожньому полотні інших дефектів покриття. Пошкоджена поверхня нагрівається і профілюється, що дозволяє не лише досягти рівності, але й за потреби скоригувати поперечний ухил дороги.

- Repave передбачає не тільки формування профілю існуючого дорожнього полотна, а й, що принципово важливо, нанесення тонкошарового покриття з новоствореної асфальтобетонної композиції.

-Remix, безсумнівно, представляє собою перспективний метод, що забезпечує кардинальну модифікацію експлуатаційних характеристик існуючого асфальтобетонного покриття через введення додаткового в'язучого компонента - бітумного матеріалу та кам'яного матеріалу. Це забезпечує відновлення зруйнованого шару зносу, стабілізацію і зміцнення покриття, а також корекцію поперечного ухилу. Покриття, відновлене за допомогою цього методу, може використовуватися як нижній шар основи, що забезпечує додаткову міцність дорожнього покриття.

-Метод Remix Plus, без сумніву, являє собою прогресивну модифікацію базової технології Remix, що суттєво розширює можливості дорожньо-ремонтних робіт. Особливість цієї інноваційної методики полягає в синхронному виконанні двох технологічних процесів: відновленні експлуатаційних властивостей наявного покриття та одночасному нанесенні свіжого шару асфальтобетонної композиції товщина якого повинна становити не менше 70 мм» [11].

Сучасним технічним засобом, що використовує наведені вище методи «являється машина Wirtgen HM 4500 — це високоефективна техніка для гарячої регенерації асфальтобетонних покриттів, призначена для продуктивного та економічного відновлення дорожнього полотна без потреби в повному демонтажі старого покриття, що представлена рисунку 1.10.



Рисунок 1.10 - Wirtgen HM 4500

Завдяки сучасним інженерним рішенням та широким можливостям, машина займає провідну позицію серед аналогічного обладнання на ринку, забезпечуючи відмінну якість регенерації покриттів і збільшуючи їх термін служби» [12].

Ця модель обладнана потужним дизельним двигуном, здатним працювати безперервно при великих навантаженнях. Це дозволяє машині обробляти великі ділянки дороги без зупинок, що є важливим чинником у підвищенні загальної продуктивності. Продуктивність «Wirtgen HM 4500 досягає 4500 м² відновленого покриття за зміну. Наприклад, модель-конкурент Magini MP 4000 відновлює лише до 4000 м², що робить HM 4500 значно продуктивнішою для виконання робіт з великим обсягом.

Ширина обробки машини становить 3,8 метра — оптимальний параметр для обробки смуг в один прохід, що дозволяє зекономити час, необхідний для регенерації покриття. У порівнянні, Caterpillar PM 500 має ширину обробки 3,5 метра, що на деяких ділянках потребує додаткових проходів.

Wirtgen HM 4500 може нагрівати асфальтобетон до температури 150–200 °С, досягаючи необхідної пластичності для рівномірного профілювання старого асфальту. Цей рівень нагрівання сприяє зменшенню ризику утворення тріщин під час експлуатації відновленого покриття. Крім того, машина оснащена системою рециркуляції матеріалу, яка забезпечує

змішування старого асфальтобетону з новими добавками, зокрема бітумом, що підвищує міцність та стабільність регенованого шару.

НМ 4500 підтримує основні методи гарячої регенерації асфальтобетону, такі як Reshape, Repave, Remix та Remix Plus, що робить її універсальною та придатною для відновлення покриттів у різному стані. Наприклад, модель-конкурент Roadtec RX-700 підтримує лише методи Reshape і Repave, що звужує її функціональні можливості» [13].

Машина дає можливість точно налаштовувати глибину нагріву та обробки залежно від стану дорожнього покриття, що дозволяє знизити витрати на ремонт та підвищити експлуатаційні характеристики дороги. Завдяки системі рециркуляції, Wirtgen НМ 4500 помітно знижує витрати на матеріали, оскільки значна частина старого асфальту використовується повторно. У порівнянні з традиційними методами, такий підхід дозволяє зекономити до 30% матеріальних ресурсів, що є вагомою перевагою при великому обсязі робіт.

У Німеччині досить широко використовується Wirtgen НМ 4500 на автодорозі де асфальтове покриття зазнало значних ушкоджень, а саме численними тріщинами, з метою відновлення його було застосовано інноваційну технологію Remix Plus, що відображено на рисунку 1.11.

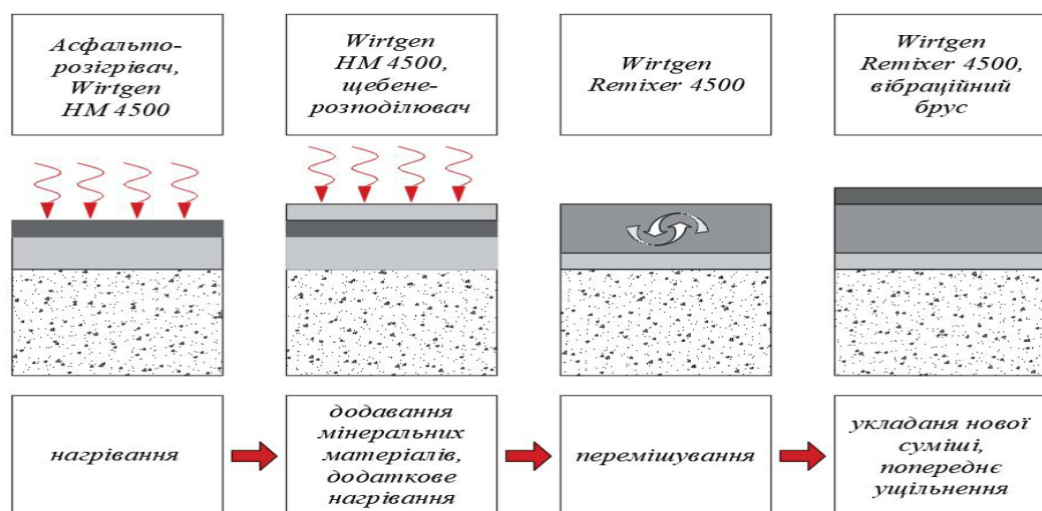


Рисунок 1.11- Процес виконання реставрації асфальтного покриття методом Remix Plus

Машина також забезпечує можливість корекції поперечного нахилу та формування рівної поверхні з високим коефіцієнтом зчеплення, що підвищує безпеку дорожнього руху. У порівнянні з основними конкурентами, як-от Marini MP 4000 і Roadtec RX-700, НМ 4500 виграє за ефективністю, універсальністю та економічністю. Продуктивність і ширина обробки у НМ 4500 вищі, ніж у конкурентів, що сприяє швидкому завершенню робіт. Крім того, наявність системи рециркуляції та можливість використовувати метод Remix Plus роблять її більш екологічною та економічно вигідною.

На відміну від деяких моделей, що придатні лише для поверхневого ремонту, НМ 4500 дозволяє працювати на різних глибинах і здійснювати регенерацію основи, що підвищує міцність покриття — це є особливо важливо для доріг із високою інтенсивністю руху. Крім того, можливість додавання до 30% нових матеріалів, таких як бітум і кам'яні заповнювачі, підвищує міцність і довговічність покриття, що виокремлює НМ 4500 серед інших машин з обмеженим функціоналом зміни складу асфальтобетону.

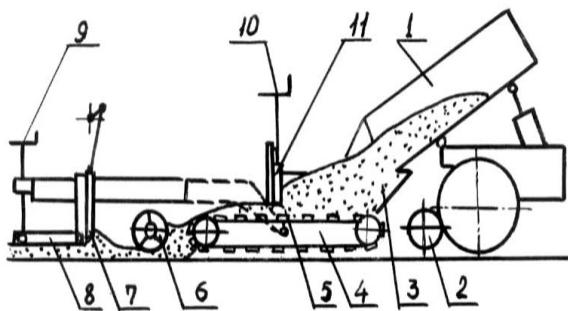
З огляду на всі перелічені характеристики, Wirtgen НМ 4500 є не лише високоефективною, а й економічно вигідною машиною для гарячої регенерації асфальтобетонного покриття, забезпечуючи надійне і тривале відновлення дорожніх поверхонь.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ТА НОВІТНІХ МЕТОДІВ ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ

2.1 Дослідження апаратно-програмних засобів, що використовуються в технологічному процесі вкладання асфальту

Асфальтоукладач «відіграє надзвичайно важливу роль під час укладання асфальтобетону, адже саме він гарантує рівномірний розподіл суміші по поверхні та здійснює початкове ущільнення перед фінальним прокатуванням катками. Головним завданням цього обладнання є контроль за товщиною та рівністю шару покриття, що в свою чергу забезпечує надійну довговічність та високу якість дорожнього полотна.

Асфальтоукладач здійснює такі функції: приймає асфальтобетонну суміш у бункер із рухомих автосамоскидів без зупинки транспортних засобів, подає суміш до ущільнювальних елементів, дозує її, рівномірно розподіляє по ширині майбутнього покриття, а також виконує попереднє та кінцеве ущільнення, технологічну схему роботи асфальтоукладача (рисунок 2.1), дає нам розуміння його ролі [13].



Риунок 2.1 Технологічна схема роботи асфальтоукладчика

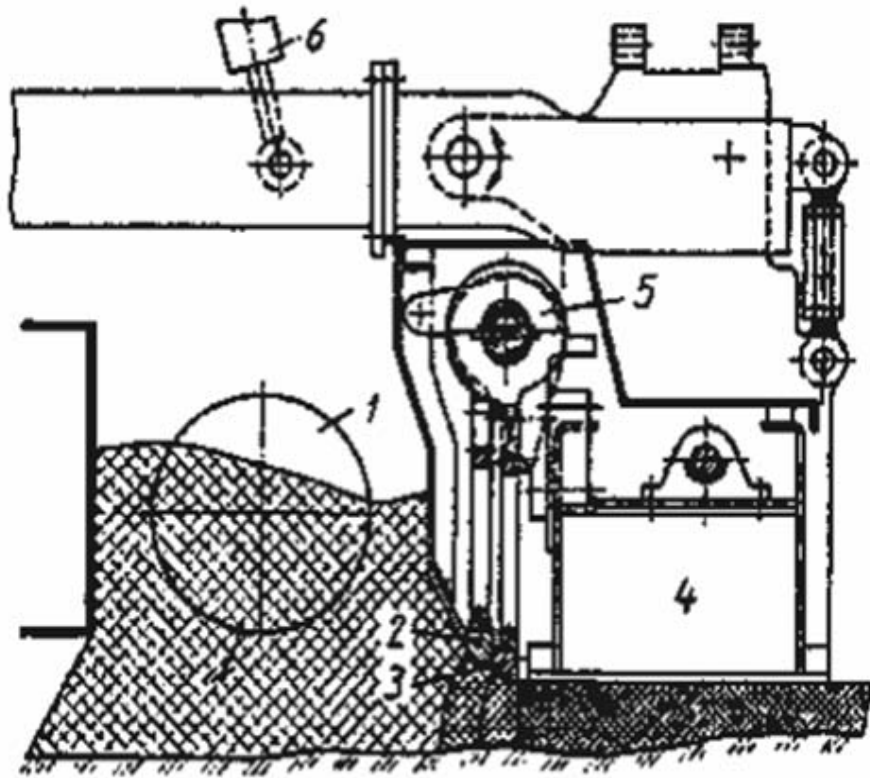
Асфальтобетонна «суміш із кузова автосамоскида 1, який під час розвантаження пересувається під дією штовхального зусилля роликів 2 укладача, надходить у приймальний бункер 3. Далі суміш із бункера через регульований отвір 5, розташований у нижній частині бункера, подається скребковими живильниками 4 на дорожнє полотно. Об'єм суміші, що

виходить із бункера, можна налаштувати шляхом зміни положення заслінки 11, яка регулюється за допомогою гвинтів 10 на різній висоті. Суміш на дорожньому покритті рівномірно розподіляється по всій ширині за допомогою гвинтових конвеєрів 6, після чого ущільнюється і вирівнюється трамбувальним брусом 7 та вигладжувальною плитою 8. Для досягнення заданого поперечного вигладжувальна плита розділена вздовж на дві частини, що з'єднані внизу шарніром, а зверху – гвинтовою стяжкою.

Регулювання товщини шару суміші здійснюється за принципом мікрометричної точності – плавним підйманням або опусканням країв вигладжувальної плити за допомогою гвинтів регулятора. Це дозволяє досягти ідеальної геометрії поверхні. Крім того, для гнучкої адаптації до різних завдань передбачено використання розширювачів на робочих органах машини» [14].

Функціональні механізми укладача асфальту виконують комплексне завдання: формування профілю, первинну компактизацію викладеного шару та фінішне оброблення його площини. Безсумнівно, конструктивні елементи самохідних укладальних машин складаються з низки важливих компонентів: дефлекторів та бічних екранів, ущільнювальної балки та розгладжувального елемента. Варто зазначити, що початкова консолідація гарячих асфальтобетонних компонентів забезпечується взаємодією вібраційного пресувального механізму та осциляційної вирівнювальної поверхні агрегату, тоді як завершальний етап ущільнення реалізується за допомогою спеціалізованих дорожніх котків.

Безперечно, розподілення суміші на дорожньому полотні відбувається по всьому діапазону ширини завдяки спіральним транспортерам, після чого здійснюється її компресія та нівелювання за допомогою трамбувального пристрою у поєднанні з розгладжувальним модулем. Як наочно продемонстровано (рисунок 2.2), представлено конструктивну будову компресійно-вирівнювального функціонального вузла асфальтоукладальної техніки.



- 1 – розподільчий шнек; 2 – трамбувальний брус попереднього ущільнення;
 3 – основний трамбувальний брус; 4 – віброплита з синфазними вібраторами;
 5 – привід трамбувальних брусів; 6 – гідроциліндр підйому та опускання бруса.

Рисунок 2.2 Робочий пристрій асфальтоукладача для високоякісного ущільнення та вигладжування

Безперечно, компресійно-нівелювальний механізм сучасного асфальтоукладача являє собою інноваційний комплекс технологічних рішень, що безпосередньо детермінує якісні характеристики дорожнього полотна. У рамках даного дослідження розглядаються фундаментальні принципи функціонування означеного агрегату, його конструктивно-технологічні особливості та визначальна роль у забезпеченні оптимальної консолідації укладеного асфальтобетонного покриття.

Функціональна парадигма агрегату базується на синергетичному поєднанні компресійного тиску та вібраційного впливу. У процесі експлуатації компресійні модулі здійснюють первинну консолідацію суміші, оптимізуючи її об'ємні характеристики та забезпечуючи надійну адгезію з

основою. Осциляційна платформа, своєю чергою, максимізує рівність покриття та оптимізує його структурну міцність.

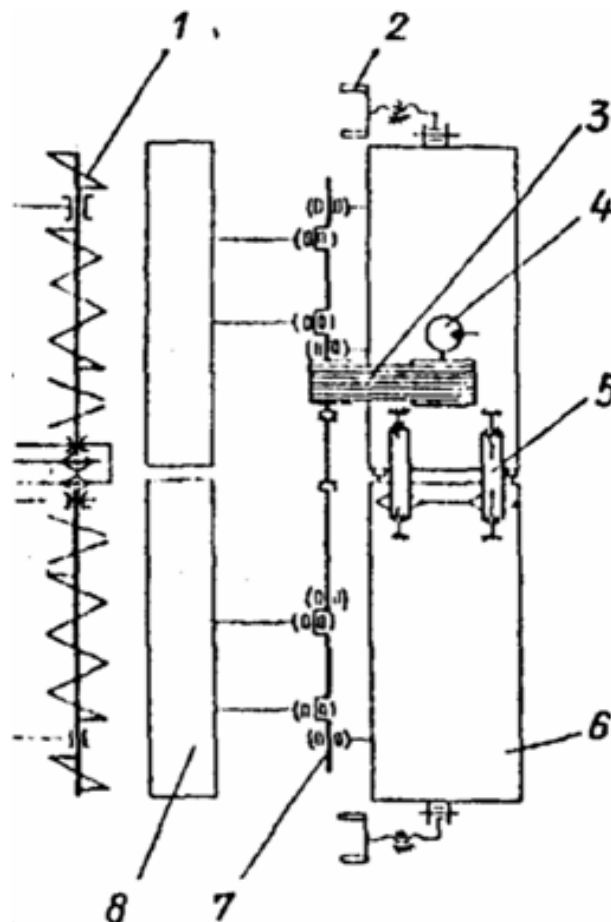
Імплементація досліджуваного механізму суттєво підвищує експлуатаційний ресурс дорожнього полотна, мінімізує ризики структурної деградації та деформаційних процесів. Оптимальний рівень консолідації матеріалу забезпечує підвищену резистентність до зношування, що набуває особливої актуальності для автомагістралей з інтенсивним транспортним навантаженням.

Компресійно-нівелювальний агрегат (КНА) виступає визначальним елементом у технологічному процесі улаштування асфальтобетонних покриттів. Інтеграція прогресивних компресійних модулів та осциляційних платформ уможлиблює досягнення оптимальних показників щільності та рівності покриття, що детермінує його довговічність та експлуатаційну безпеку. Подальші науково-технічні розвідки в означеній галузі можуть сприяти оптимізації технологічних процесів та підвищенню операційної ефективності асфальтоукладальної техніки.

Безперечно як робити дослідження асфальтоукладчика, то також важливу роль відіграє структурно-кінематична конфігурація функціонального агрегату асфальтоукладальної техніки постає фундаментальною основою для комплексного осмислення операційних принципів та інтеракційних процесів між конструктивними елементами під час реалізації технологічного циклу формування асфальтобетонного полотна (рисунок 2.3). Означена схема детермінує траєкторно-просторові переміщення ключових компонентів укладального механізму, що, своєю чергою, забезпечує оптимальну дистрибуцію, консолідацію та фінішне нівелювання асфальтобетонної композиції.

Варто зазначити, що динамічно-кінематична модель встановлює комплексні взаємозв'язки між мобільними структурними елементами укладального агрегату, синхронізуючи їх функціональну активність задля досягнення преференційних характеристик дорожнього покриття. Без

сумніву, модифікації кінематичних параметрів - зокрема, швидкісних показників, компресійного тиску чи кутових градієнтів конструктивних елементів - можуть істотно впливати на результативність технологічного процесу улаштування асфальтобетонного шару. Саме тому прецизійне калібрування кінематичної конфігурації набуває визначального значення для гарантування преміальної якості дорожнього полотна.

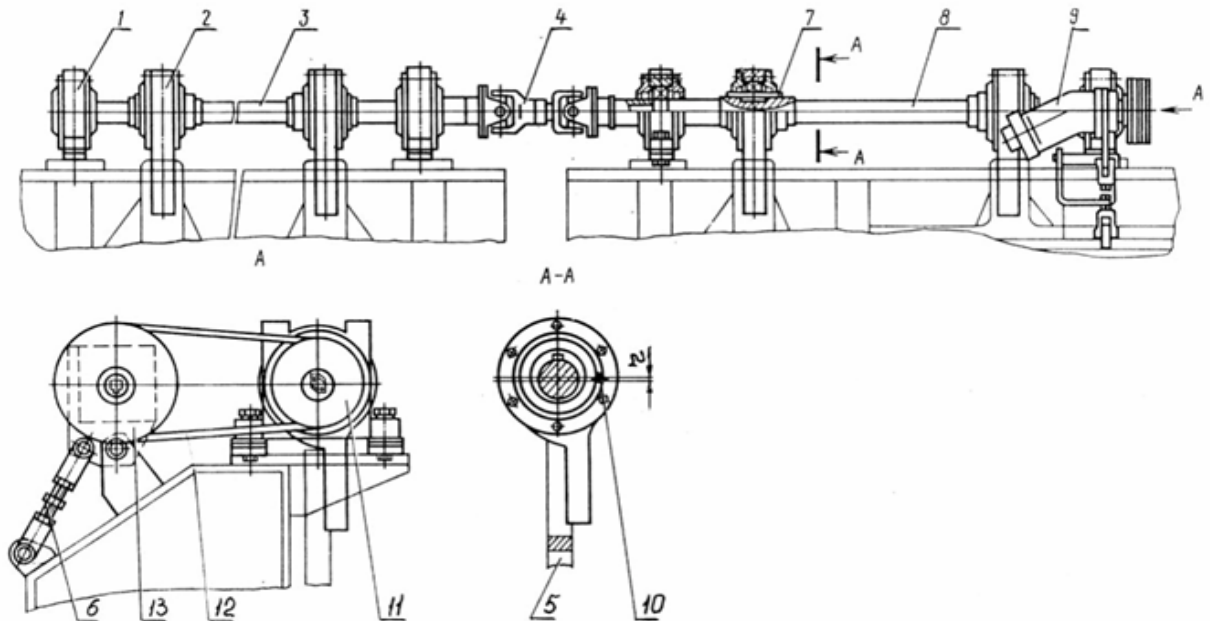


- 1 – шнек; 2 – регулятор товщини укладеного покриття; 3 – ремінна передача;
 4 – гідромотор; 5 – регулятор профілю укладеного покриття;
 6 – вигладжувальна плита; 7 – ексцентриковий вал трамбувального бруса;
 8 – трамбувальний брус.

Рисунок 2.3 Кінетична схема робочого приладу асфальтоукладача

Компресійно-профілювальний модуль «реалізує функцію первинної консолідації дорожнього полотна та його геометричного формування через нижню крайову площину. Безперечно, приводний механізм означеного агрегату, візуалізований на схематичному зображенні (рисунок 2.4), інтегрує

осьові елементи 3 та 8, що перебувають у кінематичному сполученні через карданний з'єднувальний вузол 4 » [15]



1 – підшипникова опора; 2 – шатун; 3 – вал; 4 – карданний вал;
5 – трамбувальний брус; 7 – ексцентрикова втулка; 8 – вал; 9 – гідромотор;
11 – шків; 12 – ремінь; 13 – ведучий.

Рисунок 2.4 Компресійно-профілювальний модуль

Варто зазначити, що ротаційно-поступальний рух означених осей забезпечується гідравлічним двигуном 9 через систему силової трансмісії, що складається з провідних 13 та підпорядкованих 11 шківових механізмів, об'єднаних передавальним елементом 12. Осьові компоненти, своєю чергою, спираються на прецизійні опорні вузли 1 з інтегрованими підшипниковими модулями.

Необхідно підкреслити, що ексцентричні циліндричні елементи 7, що характеризуються надійною фіксацією на осях 3 і 8 за допомогою шпонкових з'єднань, транслюють кінематичний момент шатунним механізмам 2 із чітко детермінованим ексцентриситетом r . Як наслідок, компресійно-профілювальний агрегат 5, що перебуває у конструктивному сполученні з шатунними елементами, реалізує циклічно-поступальні переміщення у вертикальній площині з амплітудним показником $2r$. Таким чином,

представлена конструктивно-кінематична конфігурація забезпечує оптимальну траєкторію руху робочого органу для максимально ефективної консолідації дорожнього покриття.

Інноваційний «трамбувальний ніж (рисунк 2.5), виготовлений зі зносостійких матеріалів, є ключовим елементом трамбувального бруса. Його конструкція, з оптимальною формою нижньої частини, дозволяє досягти максимального ступеня ущільнення асфальтобетону, підвищуючи довговічність дорожнього покриття» [16].

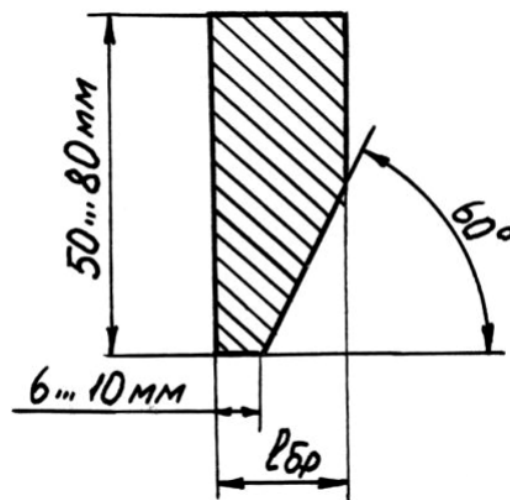


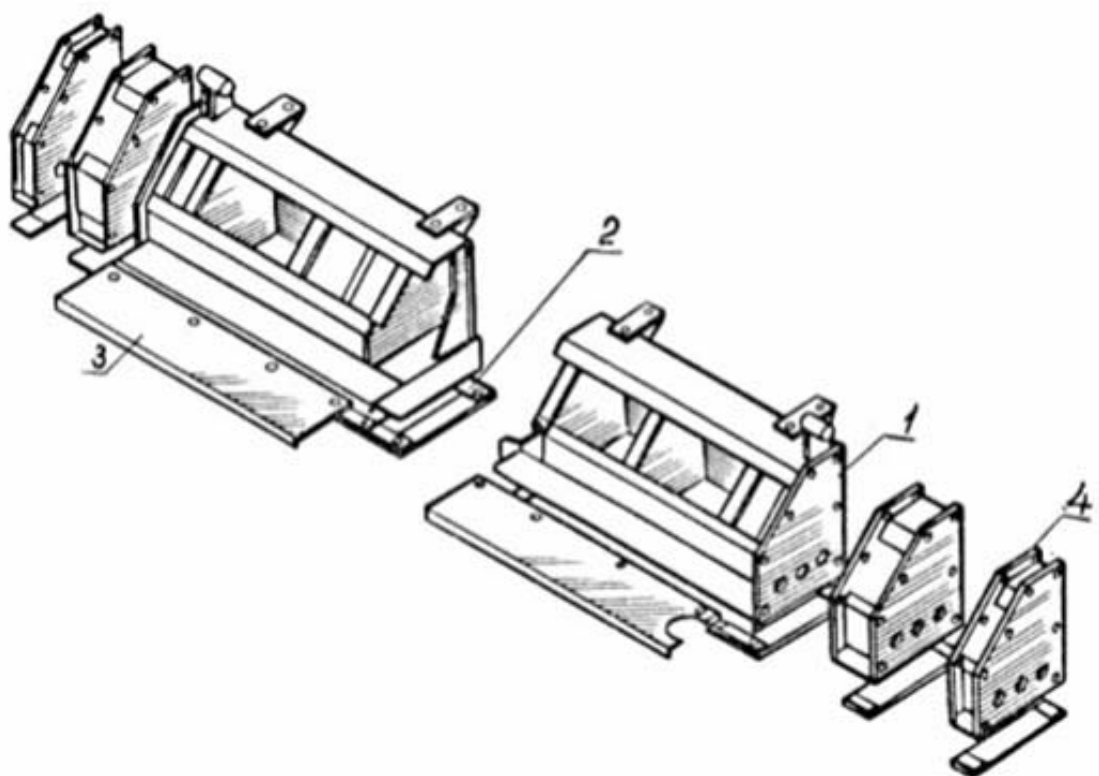
Рисунок 2.5-Трамбуючий ніж

Нівелювально-формувальна платформа «відіграє визначальну функцію у технологічному процесі улаштування асфальтобетонного покриття, забезпечуючи комплексну підтримку функціонального агрегату, геометричне профілювання поперечного перерізу полотна, його консолідацію та фінішне оброблення поверхневого шару. Безперечно, означена конструкція інтегрує дуальні сегменти, об'єднані шарнірним вузлом та регулювальним механізмом поперечного профілювання, що візуалізовано на схематичному зображенні 6.

Варто зазначити, що несучий каркас 1 платформи в сучасних укладальних агрегатах реалізується через використання прогресивної технології зварювального з'єднання спеціалізованих гнутих структурних елементів. До базового каркасу 1 у нижній площині інтегрується контактна

поверхня 2, що характеризується прецизійно відполірованою площиною та забезпечує фінішне нівелювання верхнього шару укладеної композиції.

На консольному кронштейні 3, що має жорстке з'єднання з базовим каркасом, розташовується технологічна платформа, призначена для трансверсального переміщення обслуговуючого персоналу. Задля оптимізації параметрів ширини технологічної смуги до базового каркасу 1 інтегруються модульні розширювальні елементи 4 з підвищеною надійністю фіксації (рисунок 2.6) ».



1 – рама; 2 – підшва; 3 – консолі; 4 – розширювачі.

Рисунок 2.6- Нівелювально-формувальна платформа

Необхідно підкреслити, що нівелювально-формувальні платформи диференціюються на статичні та осциляційні модифікації. Кожен сегмент віброплатформи комплектується дуальною системою вібраційних модуляторів, що мають жорстке кріплення до базового каркасу. Означені вібраційні агрегати перебувають у кінематичному сполученні через систему карданних валів та характеризуються гідравлічним типом приводу, що

концептуально подібний до приводного механізму компресійно-профільовального модуля.

Таким чином, представлена конструктивно-технологічна конфігурація забезпечує оптимальні параметри геометричного профілювання та структурної консолідації дорожнього полотна.

2.2 Дослідження інтелектуальних засобів керування, що впливають на геометричну рівність асфальтного полотна

Прогресивні інтелектуально-адаптивні комплекси регулювання (ІАКР) сучасної асфальтоукладальної техніки інтегрують мультифункціональну систему високоточних детекторів, сенсорних модулів та інноваційних обчислювальних алгоритмів задля реалізації автоматизованого моніторингу й оперативного коригування технологічних параметрів у процесі формування дорожнього полотна.

Означені технологічні рішення «уможливлюють прецизійне калібрування геометричних характеристик покриття, гарантуючи преміальні показники профільної точності та консолідаційної гомогенності асфальтобетонного шару. Більше того, впровадження подібних систем дозволяє істотно мінімізувати негативний вплив варіативних екзогенних факторів, зокрема:

- термічних флуктуацій атмосферного середовища;
- гідрометеорологічних параметрів;
- динамічних навантажень від транспортного потоку;
- структурно-реологічних характеристик укладальної композиції.

Імплементація інтелектуально-адаптивних комплексів регулювання значно оптимізує операційну ефективність укладальної техніки та максимізує якісні показники готового дорожнього покриття через автоматизацію процесів прийняття технологічних рішень на базі багатопараметричного аналізу актуальних експлуатаційних умов» [17].

Неточне встановлення стяжки асфального шару відносно осі покриття призводить до виникнення додаткових навантажень на розподіл асфальтної суміші, що розподіляється нерівномірно по ширині. Це, в свою чергу, є причиною утворення поперечних нерівностей та зниження міцності покриття. Невірний вибір початкового кута стяжки також негативно впливає на якість укладання, особливо на ділянках, що мають обширну зміну рельєфу. Значні перепади висот стяжки можуть призвести до розшарування суміші та утворення дефектів поверхні, таких як хвилястість і раковини. Занадто велика відстань між спіральним конвеєром та переднім краєм стяжки сприяє розбризкуванню матеріалу та утворенню нерівностей на поверхні

Під час «укладання асфальтового покриття на рівень значною мірою впливають такі фактори, як орієнтація укладання, швидкість роботи та процеси, що відбуваються під час укладання. Поточні методи контролю рівності покриття включають використання висячої лінії та балки. У разі використання лінійного методу геодезист повинен визначити орієнтири, що, як правило, призводить до можливих помилок і впливає на точність рівня. В балансірному методі контроль рівності залежить від якості нижнього несучого шару конструкції. Однак, у реальному процесі будівництва асфальтоукладач здебільшого залежить від ручного керування, що піддається значному впливу людського фактора та коливанням якості виконання робіт. Крім того, на укладання покриття можуть впливати транспортні засоби, що призводить до нерівномірності у швидкості укладання, а також можливих деформацій та погіршення рівності покриття через взаємодію з транспортними засобами» [18].

Технологія «3D-укладання асфальту ґрунтується на використанні тахеометра для відстеження оптичної цілі, яка встановлюється на дорозі. Ця система забезпечує точність позиціонування на рівні міліметрів і передає дані про позицію в систему керування асфальтоукладальником у реальному часі через радіозв'язок. Система порівнює фактичну висоту з проектною 3D-висотою і, на основі цього, передає інформацію про необхідні корекції

висоти в гідравлічну систему керування. Гідравлічна система за допомогою циліндрів автоматично підтягує стяжку до проектної висоти та кута нахилу, забезпечуючи таким чином точне автоматичне керування асфальтоукладальником.

Система 3D-укладання складається з трьох основних компонентів: механічної частини (асфальтоукладач), гідравлічної системи керування та автоматичної системи контролю. Механічна частина включає саму машину, а гідравлічна система відповідає за перетворення енергії для корекції параметрів укладання. Система автоматичного керування складається з кількох елементів, зокрема інтелектуальної станції, датчика нахилу, датчика кута, 2D- та 3D-блоків керування, а також цифрового радіо для безперервної передачі даних у реальному часі (рисунок 2.7)» [19].

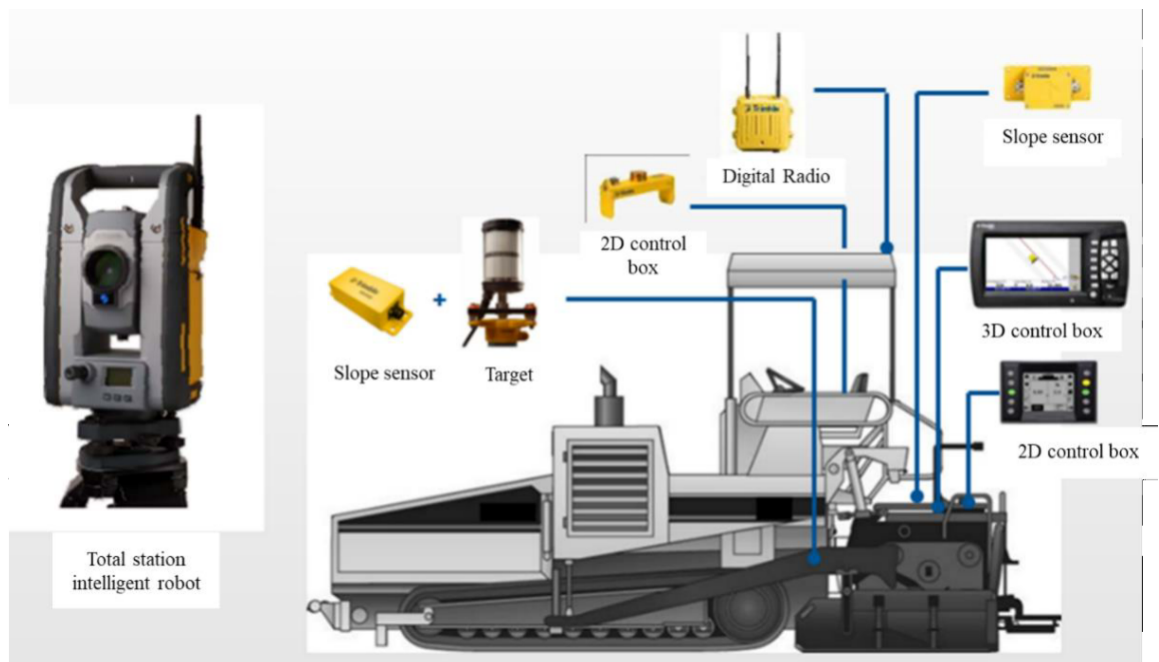


Рисунок 2.7 Інтелектуальна система вкладання асфальту

Основною частиною процесу позиціонування асфальтоукладальника є використання інтелектуального тахеометра, який дозволяє точно визначити місце розташування і коригувати параметри укладання в залежності від проектних вимог. Механічна структура асфальтоукладальника підтримує роботу тахеометра, а бортовий комп'ютер виступає основним контролером системи. Перетворювач керування функціонує як підсилювач для обробки

команд від бортового комп'ютера, забезпечуючи точну відповідність роботи гідравлічної системи. Силовий агрегат, зокрема двигун, надає необхідну потужність для руху всіх систем, а стяжка виконує функцію безпосереднього укладання покриття. Операція вирівнювання покриття за допомогою цієї технології поділяється на три етапи: створення 3D-моделі асфальтного покриття, вимірювання базових точок та безпосереднє укладання покриття.

Високоточні «тахеометричні системи (риунок 2.8) відіграють ключову роль у технологічному процесі укладання асфальтобетонного покриття, забезпечуючи максимальну операційну ефективність та підвищені якісні характеристики будівельних робіт. На етапі топографічного знімання місцевості тахеометричні комплекси генерують високоточні цифрові моделі рельєфу, визначають висотні відмітки та градієнти, а також окреслюють межі будівельного майданчика» [20].



Риунок 2.8 Тахеометр

Зібрані геопросторові дані інтегруються в проєктну документацію для оптимізації розрахунків земляних робіт та матеріально-технічного забезпечення. Тахеометричне обладнання забезпечує встановлення контрольних реперів, підтримку геометричної точності ліній укладання та точне позиціонування дренажно-водовідвідних систем.

На етапі формування основи дорожнього полотна використання тахеометричних систем дозволяє перевіряти геометричні параметри конструктивних шарів, оптимізувати використання матеріальних ресурсів та

контролювати рівність основи. Інтеграція таких комплексів включає впровадження 3D-навігаційних систем для автоматизованого контролю товщини шару, моніторингу геометричних параметрів покриття та корекції поздовжніх і поперечних ухилів.

Пост-укладальний контроль охоплює аналіз рівності, перевірку товщини покриття, моніторинг геометричних характеристик та оцінку відповідності проєктним параметрам. Впровадження зазначених технологічних рішень підвищує геометричну точність, скорочує часові витрати та раціоналізує використання ресурсів.

Таким чином, інтеграція сучасних тахеометричних комплексів призводить до значного покращення якості та операційної ефективності процесів укладання асфальтобетонного покриття, що, в свою чергу, збільшує довговічність експлуатації дорожніх покриттів. Ці технології є надзвичайно актуальними в умовах зростаючих вимог до якості транспортної інфраструктури та оптимізації будівельних процесів.

Датчик нахилу (риунок 2.9) є «невід’ємною складовою систем автоматизованого управління у процесах асфальтоукладання, особливо актуальною для дорожнього будівництва. Гладка поверхня дороги має ключове значення, оскільки будь-які нерівності ведуть до швидкого зносу покриття та зниження комфорту їзди. Датчики нахилу відстежують кут асфальтоукладача чи катка відносно горизонту, що дозволяє системі автоматизації регулювати положення техніки, змінюючи товщину асфальтного шару для досягнення необхідного рівня.

Система, що оснащена такими датчиками, автоматично налаштовує позицію робочих органів для підтримки визначеного кута нахилу. Це особливо важливо на схилах чи нерівних ділянках, де необхідно досягти рівномірного асфальтного покриття. Датчики нахилу забезпечують автоматизацію процесів, зменшуючи потребу в ручному втручанні, що підвищує точність робіт і покращує якість готової дороги» [20].



Рисунок 2.9 Датчик нахилу

Завдяки здатності швидко реагувати на зміни нахилу, знижуються помилки та скорочується час на ручне коригування. Ця точність контролю товщини укладання сприяє оптимальному використанню асфальтної суміші, що дозволяє уникнути перевитрати матеріалів, зберігає кошти і зменшує екологічне навантаження. Системи, які використовують датчики нахилу, значно знижують необхідність ручного втручання під час укладання асфальту, підвищуючи таким чином безпеку операторів техніки.

Датчик «MT900 відіграє важливу роль у високотехнологічних системах автоматизації та управління процесами укладання асфальту, гарантуючи точність позиціонування техніки і високий рівень контролю якості. Цей компонент є ключовим у сучасних системах машинного керування, таких як GPS, GNSS або системи на базі тотальних станцій, які дозволяють з високою точністю контролювати рівень і товщину асфальтового шару.

MT900 використовується для точного визначення положення техніки, залученої до процесу, зокрема асфальтоукладачів. Це дозволяє забезпечити стабільність руху техніки та зберегти точність в межах встановлених параметрів. Завдяки постійним даним про місцезнаходження, орієнтацію та висоту машини система надає можливість оператору коригувати рух у режимі реального часу, зберігаючи точність роботи.

Функція позиціонування в реальному часі дозволяє автоматично регулювати висоту шасі для забезпечення рівномірного покриття асфальту, що є важливою умовою для довговічності дороги. Датчик MT900 дозволяє

ретельно контролювати товщину укладеного шару асфальту відповідно до проектних параметрів.



Риунок 2.10 Датчик МТ900

Автоматизація за допомогою датчиків знижує ймовірність помилок, які можуть виникати через людський фактор, підвищуючи якість укладання та зменшуючи тривалість робіт. Оператори постійно отримують інформацію про процес, що дає змогу оперативно виявляти та усувати недоліки, запобігаючи неефективному використанню матеріалів.

Датчик «МТ900 також інтегрується з іншими системами на будівельній техніці, такими як датчики тиску і температури асфальту, що дозволяє здійснювати комплексний контроль за усіма аспектами процесу. Така взаємодія дає змогу оптимізувати використання ресурсів і забезпечити точне виконання кожної технологічної операції.

Завдяки детальним даним про товщину та рівень асфальтного шару, система автоматично регулює налаштування техніки для досягнення оптимальних параметрів укладання. Це допомагає уникати зайвих витрат матеріалів, підтримуючи задані параметри та забезпечуючи довговічність та якість дорожнього покриття.

Датчик 04-20-10010 PWM (рисунок 2.11), допомагає асфальтоукладчику автоматично коригувати свою роботу відповідно до заданих параметрів, забезпечуючи високу точність виконання робіт.

Додавання 3D-сканування та використання даних GPS дозволяє створити детальну цифрову модель місцевості, що дозволяє машині працювати з максимальною точністю навіть на складних ділянках. Модуль клапанів, як виконавчий орган системи, забезпечує плавне та точне регулювання робочих органів, що дозволяє оптимізувати процес укладання асфальту та підвищити продуктивність робіт» [21].



Рисунок 2.11- Датчик 04-20-10010 PWM

Цей датчик виконує кілька важливих функцій. По-перше, він забезпечує рівномірність покриття, оскільки датчик стежить за підтриманням заданого рівня висоти укладання, автоматично реагуючи на нерівності, що мінімізує утворення хвиль і западин на дорозі, забезпечуючи рівну поверхню. По-друге, датчик контролює якість укладання: точність вимірювання, яку забезпечує цей датчик, підтримує однорідність шару асфальту, що безпосередньо впливає на довговічність дорожнього полотна і важливо для забезпечення стабільності та витривалості дорожнього покриття. По-третє, завдяки точному контролю за висотою асфальту, сенсор допомагає уникати перевитрати матеріалів. Система автоматично коригує товщину шару

відповідно до проектних параметрів, знижуючи витрати. І нарешті, завдяки PWM-інтерфейсу, сенсор надсилає сигнал до блоку управління, який оперативно реагує на зміну висоти та коригує роботу гідравлічної системи асфальтоукладальника в режимі реального часу, дозволяючи машині автоматично регулювати своє положення без втручання оператора.

Датчик нахилу Moba 04-21-21010 (рисунок 2.12) є важливим компонентом у забезпеченні якості та надійності асфальтових покриттів. Він виконує функцію постійного контролю кута нахилу асфальтоукладальника і автоматично налаштовує його положення для досягнення максимально рівної поверхні. Завдяки точному сенсору, цей датчик безперервно фіксує кут нахилу робочої платформи машини. Отримані показники надходять до системи управління, яка, опрацьовуючи їх у режимі реального часу, надсилає команди виконавчим механізмам.

Ця автоматизація дозволяє асфальтоукладальнику підтримувати стабільний нахил навіть на складних ділянках, що забезпечує рівномірність товщини асфальтового шару і, відповідно, підвищує стійкість та довговічність дорожнього покриття.



Рисунок 2.12- Moba 04-21-21010

Датчик «Trimble SNR921, оснащений GPS-антенною, відіграє важливу роль у системах контролю параметрів укладання асфальту. Завдяки можливості приймати GPS-сигнали та передавати дані на частоті 900 МГц через радіоканал, цей пристрій забезпечує високу точність позиціонування

асфальтоукладача, що є критично важливим для точного дотримання проектних вимог.

Основне завдання датчика Trimble SNR921 (рисунок 2.13) у системі контролю укладання асфальту полягає у забезпеченні відповідності висоти та нахилу поверхні встановленим параметрам. Датчик приймає корекційні сигнали від базової GPS-станції, що дозволяє асфальтоукладачу підтримувати точний рівень і кут нахилу згідно з проектом. Завдяки передачі даних у режимі реального часу система може постійно контролювати положення машини, що запобігає відхиленням від заданої траєкторії і сприяє рівномірному покриттю.

Точне позиціонування укладальника забезпечує контроль за товщиною асфальтного шару, дозволяючи уникнути надмірного або недостатнього використання матеріалу, що підвищує економічну ефективність проекту. Підтримання параметрів, таких як висота, ухил та траєкторія руху, сприяє створенню рівного та міцного дорожнього покриття, що краще витримує навантаження і зношення» [21].



Рисунок 2.13- Trimble SNR921

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження сучасної технології укладання асфальту з використанням 3D-системи механічного управління. Розглянуто вплив сучасних інтелектуальних датчиків та сенсорів асфальтоукладальника на процес будівництва на рівність асфальтового покриття. Технологія 3D-укладання забезпечує високу точність у контролі вирівнювання, товщини та площинності асфальтового шару, що позитивно позначається на якості покриття. Завдяки автоматизації, стандартизації та

застосуванню інтелектуальних систем у роботі асфальтоукладальників, нова технологія покращує ефективність, надійність і довговічність дорожнього покриття, забезпечуючи його відповідність найвищим стандартам.

2.3 Дослідження ролі температурного режиму укладання асфальту на якість дорожнього полотна

Температурний режим є важливим при укладанні асфальту, оскільки від нього залежить міцність, довговічність та рівність дорожнього покриття. Температурні сенсори, вбудовані в асфальтоукладач, забезпечують точний контроль температури асфальтної суміші під час укладання, що дозволяє уникати дефектів покриття та підвищує ефективність процесу. Асфальтна суміш повинна укладатися при визначеній температурі (зазвичай 120–160 °C), оскільки занадто висока температура приведе до випаровування летючих компонентів, що знижує якість покриття, а занадто низька температура призводить до недостатнього ущільнення асфальту, що може спричинити тріщини та нерівності.

Значущою проблемою залишається контроль температурного режиму та мінімізація теплових втрат під час укладання асфальту. У цьому напрямі використовуються термоізовані самоскиди та інноваційні методи для постійного моніторингу температури асфальтової суміші на регулярних коротких інтервалах протягом усього процесу укладання. Завдяки такому підходу стало можливим визначити критичні моменти й ситуації, пов'язані зі значним зниженням температури під час перевезення та укладання суміші.

Для вимірювання температури встановлюються різні датчики як на асфальтоукладачі, так і на ущільнювальних пристроях. На рисунку 2.13 зображено вимірювальну балку, розміщену в задній частині асфальтоукладача, оснащену температурними датчиками, які розташовані з однаковими інтервалами, а також інфрачервоним сканером, встановленим на даху. Під час стандартних дорожніх робіт застосовуватиметься переважно

інфрачервоний сканер, оскільки він значно зручніший у використанні. Балка для вимірювань, яка була застосована на тестовій ділянці, використовується для додаткового контролю. Накладання двох температурних графіків на рисунку 2.14 підтверджує, що застосування одного інфрачервоного сканера є достатньо ефективним для контролю температури під час робіт.



а

б

Рисунок 2.14- Розташування приладів вимірювання температури на асфальтоукладачі (а), дисплей на асфальтоукладальнику для моніторингу та документування температури асфальтобетонної суміші під час встановлення (б)

Температурний сенсор «МОВА Pave-TM (рисунок 2.13 б) дозволяє здійснювати безперервний моніторинг температури суміші на виході з асфальтоукладача. Він використовує інфрачервоний метод вимірювання температури, має діапазон температур до 250 °C та вбудовану систему калібрування для забезпечення високої точності. Роль у системі полягає у підтриманні оптимальної температури суміші, що зменшує ризик розшарування та втрати пластичності під час укладання.

Під час укладання асфальту в структуру дорожнього полотна встановлюються спеціальні датчики – пасивні транспондери (рисунок 2.15) Вони дозволяють у будь-який момент дізнатися, наскільки гарячий асфальт. Ця інформація є критично важливою для водіїв катків, які займаються

ущільненням асфальту. Адже від температури матеріалу залежить, наскільки ефективно він ущільнюється і як довго служитиме дорога. Завдяки датчикам, водії отримують точні дані про оптимальний час для початку і завершення ущільнення. Це дозволяє уникнути як передчасного, так і запізненого ущільнення, що може призвести до появи тріщин і деформацій дорожнього покриття. В найближчому майбутньому планується обладнати катки цифровими дисплеями, які в режимі реального часу інформуватимуть водія про температуру асфальту та інші важливі параметри» [22].



Рисунок 2.15- Встановлення пасивних датчиків температури та зчитування поточної температури асфальту в укладеному шарі (ліворуч) і блок індикації температури на котку (праворуч)

Завдяки вбудованим пасивним транспондерам, ми отримуємо можливість створювати інтелектуальні дороги, які здатні самостійно "повідомляти" про свій стан. Ці датчики, закопані в асфальт під час будівництва, протягом усього терміну експлуатації дороги збирають дані про температуру дорожнього полотна. Ця інформація є незамінною для ефективного управління дорожньою інфраструктурою. Взимку, завдяки даним з датчиків, можна своєчасно виявити ділянки, схильні до обмерзання, і вжити заходів для запобігання аварій. Влітку, навпаки, можна моніторити

температуру асфальту, щоб уникнути його деформації та забезпечити довготривалу експлуатацію дорожнього покриття.

Температурні сенсори відстежують температуру асфальту на кожному етапі укладання, що дозволяє системі автоматизації сигналізувати про відхилення від заданих параметрів та коригувати режим укладання в реальному часі. Сенсори допомагають уникати ситуацій, коли асфальт занадто охолоджений або перегрітий, що зменшує ризик появи тріщин, розшарування чи утворення пор. Завдяки контролю температурного режиму можна уникнути потреби у повторному укладанні, що скорочує тривалість робіт та знижує витрати на матеріали.

Застосування «інфрачервоної термографії в дослідженні дозволило виявити приховані проблеми, пов'язані з температурними неоднорідностями в гарячій асфальтобетонній суміші (рисунок 2.16). Виявлені значні перепади температур підтверджують необхідність ретельного контролю температурного режиму на всіх етапах будівництва доріг» [28].

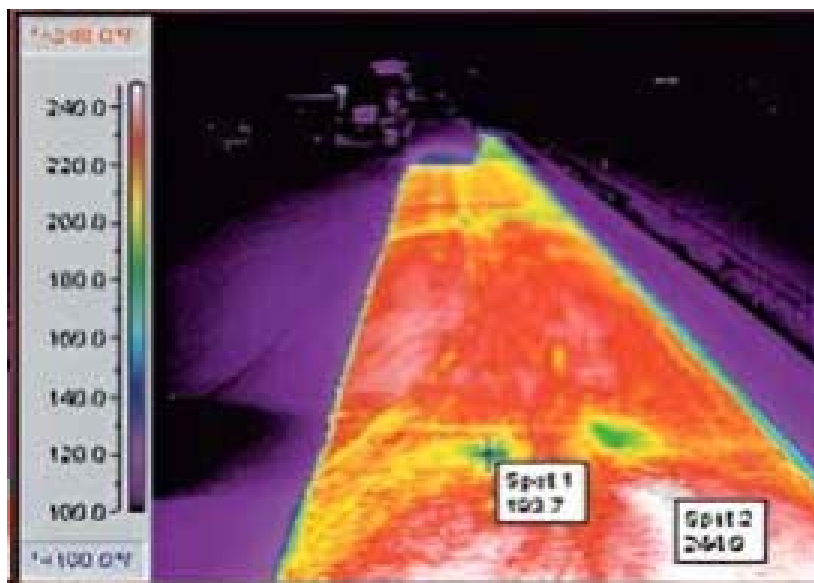


Рисунок 2.16-Контрольні точки заміри температурного режиму після вкладання асфальту

Передчасне руйнування дорожнього покриття, спричинене температурними неоднорідностями в асфальті, призводить до значних економічних втрат, пов'язаних з ремонтом доріг. Крім того, часті ремонти

доріг негативно впливають на довкілля, безперечно, така діяльність призводить до катастрофічного зростання обсягів токсичних викидів у навколишнє середовище. Звідси контроль температури асфальтобетонної суміші є важливим кроком до створення більш стійких і довговічних дорожніх покриттів.

3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВКЛАДАННЯ АСФАЛЬТУ

3.1 Розрахунок параметрів гідравлічної схеми асфальтоукладача

Впровадження передових технологічних рішень у сфері спорудження транспортної інфраструктури, зокрема автошляхів, безпосередньо пов'язане з розробкою та імплементацією кіберфізичних комплексів для моніторингу та регулювання щільнісних характеристик асфальтобетонних компонентів. Оптимізація технологічних операцій у подібних проєктах вимагає постійного моніторингу якісних показників ущільнення та координації роботи дорожньо-будівельної техніки. Дослідження висвітлює інноваційні підходи до створення розумної системи контролю та керування ступенем ущільнення асфальтобетонних сумішей. Запропонована система базується на використанні нейромережевих алгоритмів та аналогових та цифрових ПД регуляторів, що забезпечують синхронізовану роботу асфальтоукладачів та віброкатків. Архітектура системи автоматизованого управління процесом ущільнення асфальтобетонної суміші укладальним обладнанням представлена на рисунку 3.1 де «відображено такі компоненти: g_a — цільовий параметр; e_a — відхилення від заданого значення; u_a та y_a — вхідний керуючий сигнал та вихідний контрольований параметр відповідно; f_a — зовнішні дестабілізуючі фактори, що впливають на вхідні параметри; OY_a — керований об'єкт: процедура ущільнення асфальтоукладальною машиною; ПД — пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор» [20].

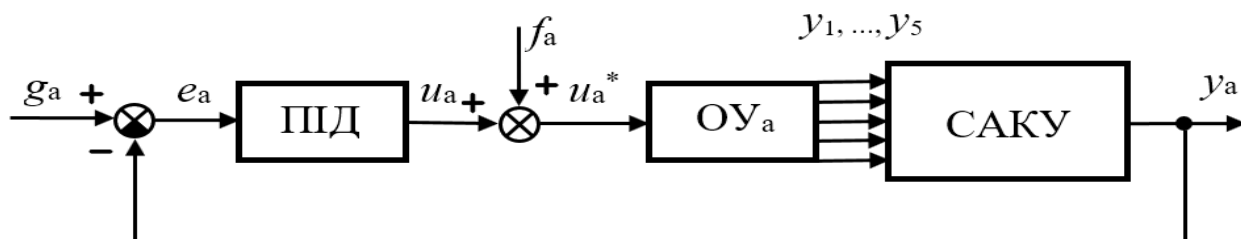


Рисунок 3.1- Комплекс для забезпечення однорідності та міцності
асфальтового покриття шляхом контролю щільності

Завдання для встановлення параметрів САУ за щільністю — це об'ємна щільність асфальтобетонної суміші, яка визначається ще на етапі проєктування організації виконання робіт. Враховуються наявні в організації дорожні катки, автоматизовані ущільнювальні машини, а також максимальна ущільнювальна здатність асфальтоукладальників. Регульованим параметром виступає частота впливів ущільнення, що здійснюється трамбувальним брусом. Регульована змінна, яку контролює САУ для підтримки щільності, — щільність асфальтобетонної суміші (γ_a). Це значення визначається інтелектуальною системою автоматизованого контролю та управління, а потім безперервно передається у формі інформаційного сигналу через бездротовий зв'язок на приймачі дорожніх машин.

Початковий розділ кваліфікаційного дослідження пов'язаний з всебічним аналізом сучасних методів влаштування асфальтобетонного покриття. Здійснено глибокий технічний аналіз функціонування високотехнологічного асфальтоукладального комплексу, включаючи детальне дослідження взаємодії його інтегрованих підсистем. Особливу увагу приділено характеристиці ключових робочих вузлів механізму: висвітлено конструктивні особливості та принципи роботи вібраційно-трамбувального механізму та нівелювальної плити, які забезпечують якісне ущільнення дорожнього полотна. Представлено структурно-функціональну схему інтелектуальної системи автоматичного контролю та регулювання параметрів ущільнення асфальтобетонної суміші. Сформульовано концептуальні засади та стратегічні цілі створення смарт-системи управління технологічним процесом.

Функціонування виконавчих механізмів асфальтоукладальної машини забезпечується комплексною системою гідравлічних приводів. Схематичне зображення гідравлічної системи базової моделі укладальника відображено на рисунку 3.2. Аналізуючи експлуатаційне призначення, представлену «гідравлічну систему можна структурувати на два ключових компоненти: спеціалізований гідропривід вібраційно-трамбувального механізму та

багатоконтурну систему керування технологічними операціями. Система керування охоплює наступні функціональні вузли:

- силові гідроциліндри Ц1 та Ц2, що забезпечують вертикальне позиціонування робочого вузла;
- виконавчі гідроциліндри Ц3 та Ц4 для маніпулювання бортами приймального бункера;
- прецизійні гідроциліндри Ц5 та Ц6, інтегровані в автоматизовану систему "Стабілошар";
- гідравлічні муфти МФ1 та МФ2, що регулюють роботу транспортерно-розподільчого механізму;
- тягові гідромуфти МФ3 та МФ4, які відповідають за поступальний рух машини» [21].

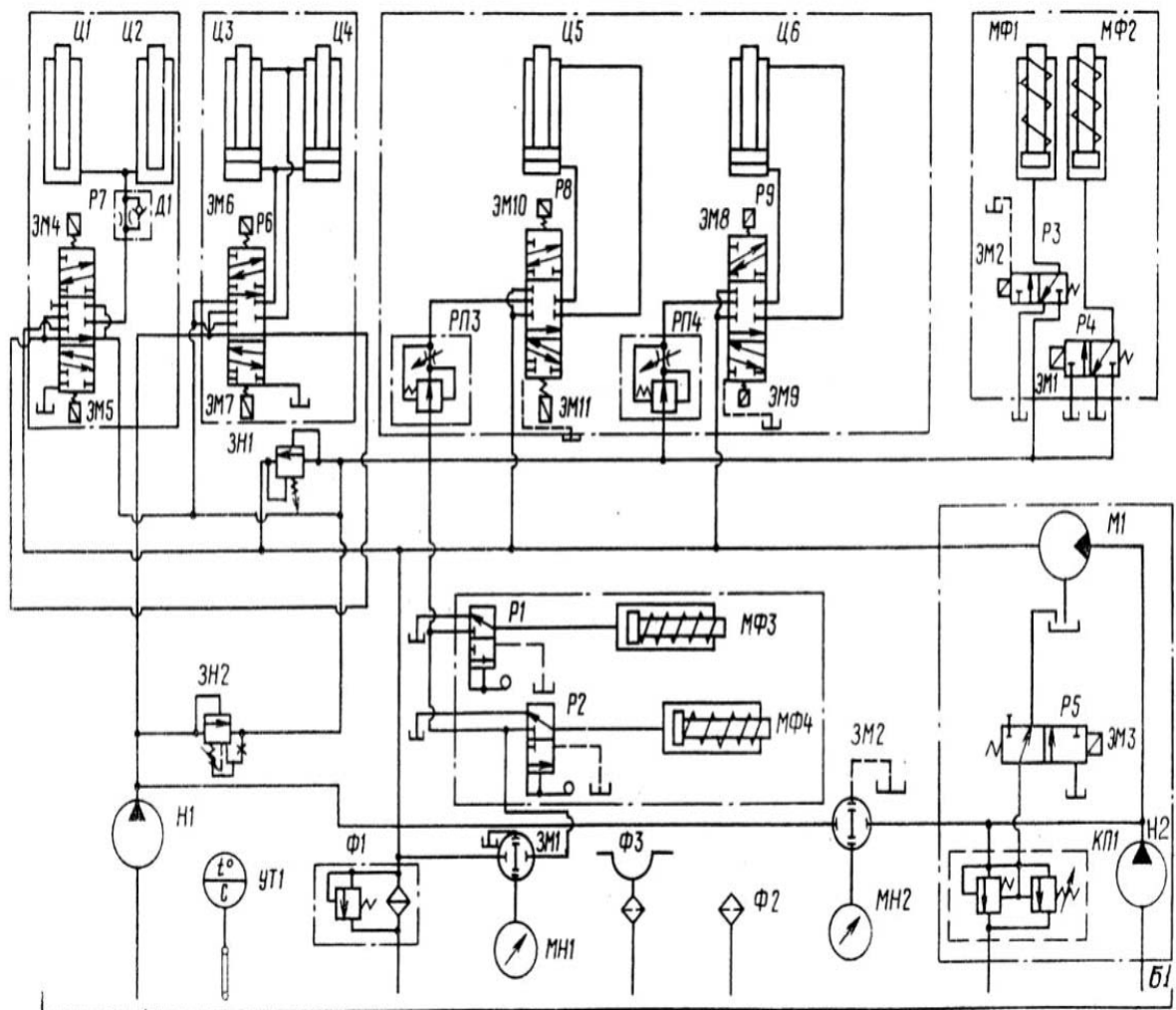


Рисунок 3.2- Гідравлічна схема асфальтоукладача

Комплекс «гідравлічного приводу вібраційно-трамбувального механізму інтегрує наступні ключові компоненти: нагнітальний насос Н2, силовий гідромотор М1, захисний клапанний механізм КП1 та регулювальний розподільник Р5. Силова установка насосу Н2 генерує гідравлічний потік для забезпечення обертального моменту гідромотора М1, який трансформує гідравлічну енергію в механічну роботу трамбувального вузла. Запобіжно-регулювальний клапан КП1 виконує подвійну функцію: захист гідросистеми від надлишкового тиску та контроль циклу роботи гідромотора через комутаційний розподільник Р5.

При деактивованому стані електромагнітного керування ЕМ3 розподільника Р5, магістраль керування клапаном КП1 комутується з дренажною лінією. За таких умов робоча рідина циркулює через розвантажувальний контур: від насосного агрегату Н2 через запобіжний клапан КП1 на злив через фільтраційний елемент Ф1. У цьому режимі насос Н2 функціонує в енергоощадному розвантаженому стані, а трамбувальний механізм залишається нерухомим.

Активация електромагніту ЕМ3 призводить до перемикання розподільника Р5, який блокує керувальну магістраль клапана КП1. Внаслідок цього потік робочої рідини спрямовується до виконавчого гідромотора М1, що ініціює робочий цикл трамбувального механізму. Розрахуємо основні параметри гідравлічної схеми асфальтоукладача врахувавши основні параметри» [21].

Оптимальна за параметрами потужність гідродвигуна визначається для трамбувального бруса, що відбувається з урахуванням виразу:

$$P_g = 130 * 10^3 \text{ Вт};$$

Частоту обертів гідродвигуна обчислюємо за формулою (3.1):

$$\omega_n = 2000 * 2 * \frac{\pi}{60}; \quad (3.1)$$

на основі цього: Масу трамбувального бруса приймаємо як:

$$\omega_n = 209,44 \text{ 1/с.};$$

Радіус повороту гідродвигуна:

$$\rho = 7 * 10^{-3} \text{ м}$$

Масу трамбувального бруса приймаємо як:

$$m_i = 500 \text{ кг}$$

Силу, що впливає на трамбууючий засіб визначається за виразом(3.2)

$$m_i * g = 4,903 * 10^3 \text{ Н}. \quad (3.2)$$

Максимальну силу, що виникає при обертанні маси трамбувального бруса під впливом нормального прискорення, обчислюємо за формулою (3.3):

$$F_m = m_i * \omega_g^2 * \rho, \quad (3.3)$$

звідки

$$F_m = 1,535 * 10^3 \text{ Н}.$$

Для обчислення динамічного показника мінімального силового впливу, що генерується вібраційно-трамбувальним механізмом та передається на асфальтобетонне покриття у часовій площині, застосовуємо математичну залежність, відображену у рівнянні (3.4):

$$F_{\min} = m_i * g + \frac{F_m}{16} * \sin\left(\frac{\omega_g}{4} * t\right), \quad (3.4)$$

$$F_{mi} = m_i * g + \frac{F_m}{16} = 1,45 * 10^4 \text{ Н}.$$

Представлена залежність відображена нижче на рисунку 3.1.

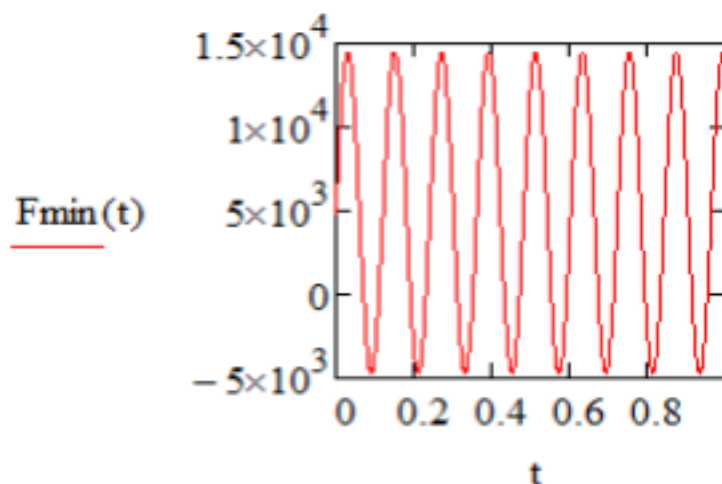


Рисунок 3.3- Нижня межа силового впливу, що генерується вібраційно-трамбувальним механізмом укладальної машини

Інтервал коливання силового впливу, що генерується вібраційно-трамбувальним механізмом під час технологічного циклу та передається на шар асфальтобетонного покриття в часовій площині, обчислюємо відповідно до аналітичної залежності, представленій у рівнянні (3.5):

$$F_{\max} = m_t * g + F_m * \sin(\omega_g * t), \quad (3.5)$$

$$F_{\max} = m_t * g + F_m = 1,584 * 10^5 \text{ H}.$$

Дані рівняння у графічному вигляді представлено на рисунку 3.4.

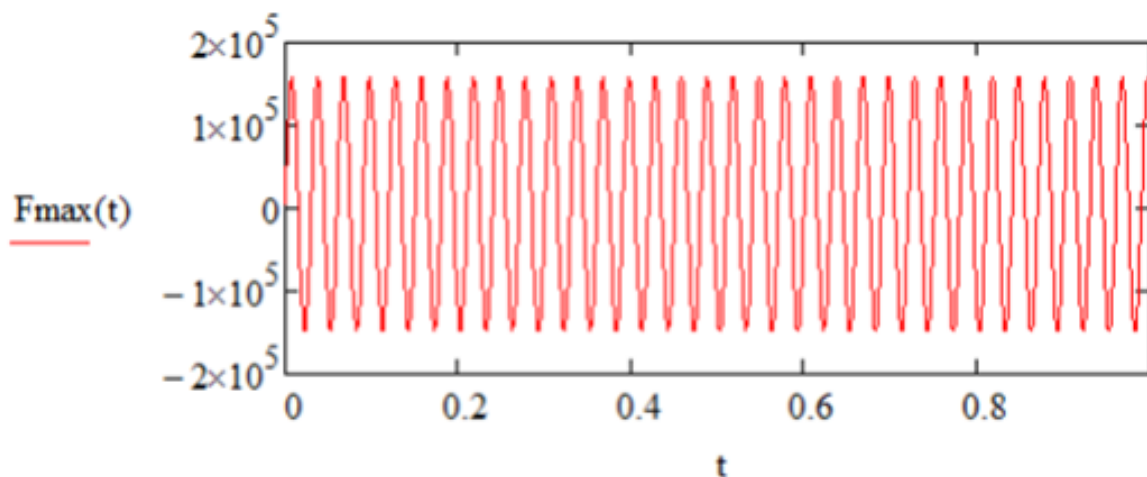


Рисунок 3.4- Максимальне зусилля для трамбуючого бруса

Інтервал змінювання зусилля, яке генерується трамбуючим брусом і передається на покриття, обчислюється за формулою (3.6):

$$\Delta F = F_{ma} + F_{mi} = 1,439 * 10^5 \text{ H}.$$

Діапазон «коливань частоти динамічного силового впливу, який генерується вібраційно-трамбувальним механізмом у часовому вимірі та спрямований на ущільнення верхнього шару асфальтобетонного покриття, розраховуємо за математичною залежністю, представленою у рівнянні (3.7)» [22]:

$$\Delta F = \omega_g - \frac{\omega_g}{4} = 157,08, \quad (3.7)$$

звідки

$$\frac{\omega_g}{4} = 52,36 \text{ 1/с}.$$

Застосування формул (3.8) і (3.9) дає змогу визначити момент інерції гідродвигуна.

$$J_t = m_t * p^2 = 0,025 \text{ м}^2 * \text{кг}, \quad (3.8)$$

$$\frac{F_{\text{ма}}}{g} * \rho^2 = 0,792 \text{ м}^2 * \text{кг}, \quad (3.9)$$

Насос створює в магістралі максимальний тиск, рівний:

$$P_m = 16 * 10^6 \text{ Па},$$

Для визначення максимального потоку рідини, потрібного для вибору розподільника, ми використовуємо формули (2.10) і (2.11):

$$q = \frac{P_g}{P_m}, \quad (2.10)$$

$$q = 8,125 * 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$D = \frac{q}{\omega_g} = 0,039 \text{ л}. \quad (2.11)$$

Приймаємо за основу, що насос створює в магістралі максимальний тиск, рівний P_{1m} . Максимальний потік рідини за таких умов розраховуємо за формулами (2.12) і (2.13):

$$P_{1m} = 2 * 10^6 \text{ Па},$$

$$q_1 = \frac{P_g}{P_{1m}} = 0,065 \text{ м}^2 / \text{с}, \quad (3.12)$$

$$D_1 = \frac{q_1}{\omega_g} = 0,31 \text{ л}. \quad (3.13)$$

Дослідивши гідравлічний привід робочого органу асфальтоукладача. було проведено розрахунки, а представлена схема дозволяє оцінити ефективність функціонування системи та визначити оптимальні режими її роботи.

3.2 Розробка імітаційної моделі аналогового та цифрового ПП-регулятора системи керування асфальтоукладчика

Розробка та імплементація аналогового ПП-регулятора є визначальним етапом для процесу оптимізації автоматизованої системи керування

укладальною машиною. Високотехнологічний асфальтоукладач повинен забезпечувати прецизійне нанесення асфальтобетонної суміші з точним контролем комплексу технологічних параметрів: швидкості переміщення, геометрії шару та інших критичних характеристик, що безпосередньо впливають на експлуатаційні властивості дорожнього полотна.

Впровадження «ПІ-регулятора мінімізує амплітуду коливань та нівелює нестабільності в роботі укладального комплексу, забезпечуючи прецизійне керування виконавчими механізмами. Це має критичне значення для формування однорідного шару асфальтобетонного покриття з заданими характеристиками. Інтегральний компонент регулятора ефективно компенсує систематичні похибки, що виникають внаслідок конструктивних особливостей механізмів або впливу зовнішніх факторів, таких як геометричні неоднорідності основи. Це забезпечує адаптивність укладального комплексу до варіативних умов експлуатації.

Архітектура «ПІ-регулятора дозволяє здійснювати тонке налаштування під конкретні експлуатаційні умови гарантуючи стабільну якість укладання. Оптимізація пропорційного та інтегрального коефіцієнтів забезпечує баланс між швидкодією системи та точністю регулювання» [23].

Оскільки коефіцієнт передачі $K_d = 82,5$, а час перехідного процесу $t_p = 1,04$ с. Звідси необхідно визначити постійну часу. Постійна часу визначається за формулою (4.1):

$$T_d = \frac{t_p}{3} \quad (3.14)$$

Звідси

$$T_d = \frac{1,04}{3} = 0,347 \text{ с.}$$

Математична модель динамічної поведінки гідравлічного приводу, що функціонує під керуванням електрогідравлічного розподільного механізму за умови абстрагування від впливу реактивного моменту з боку робочого навантаження, описується передаточною характеристикою, відображеною у рівнянні (3.15):

$$W_d(S) = \frac{k_d}{T_d S + 1}. \quad (3.15)$$

Математична характеристика незамкненого контуру СК, оснащеної ПІ регулятором аналогового типу, представлена аналітичною залежністю, наведеною у рівнянні (3.16):

$$W_d(S) = \frac{k_d}{T_d S + 1} * \left(K_p + \frac{1}{S} \right). \quad (3.16)$$

Що ми переведемо до наступного вигляду:

$$\frac{k_d}{T_d S + 1} * \left(K_p + \frac{1}{S} \right) = \frac{K_d + K_d * K_p * s}{T_d s^2 + s}.$$

Відобразимо:

$$B(s) = K_d + K_d * K_p * s,$$

$$C(s) = T_d s^2 + s$$

Аналітичне відображення динамічних характеристик системи автоматичного керування із зворотним зв'язком, що містить ПІ-регулятор аналогового типу, описується математичною залежністю (3.17):

$$K(s) = \frac{B(s)}{D(s)} \quad (3.17)$$

звідки

$$D(s) = B(s) + C(s) = T_d s^2 + (K_d * K_p + 1) * s + K_d.$$

Визначаємо «оптимальне значення коефіцієнта пропорційності K_p для ПІ-регулятора аналогового типу здійснюємо шляхом застосування методології модульного оптимуму, що відображено математичною залежністю у рівнянні (3.18)» [24]:

$$K_p = \sqrt{2} * \sqrt{\frac{T_d}{K_d}} - \frac{1}{K_d} \quad (3.18)$$

$$K_p = 0.08.$$

За допомогою виразів (3.19), (3.20), (3.21), визначаємо особливості перехідного значення процесу та коефіцієнт демпфера у системі оптимізації:

$$T_m = \sqrt{\frac{T_d}{K_d}} = 0,065 \text{ c}, \quad (3.19)$$

$$t_p = 3,2 * T_m = 0,207 \text{ c}, \quad (3.20)$$

$$\xi = \frac{K_d * K_p + 1}{2 * T_m * K_d} \quad (3.21)$$

Розроблена модель аналогового ПІ-регулятора розроблена в середовищі Simulink представлена на рисунку 3.5.

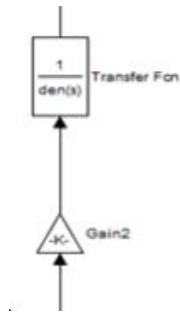


Рисунок 3.5-Структурна модель аналогового пі-регулятора асфальтоукладчика

На рисунку 3.6 зображено спрощену модель контуру регулювання швидкості руху робочого органу асфальтоукладача. Для компенсації зовнішніх збурень та забезпечення стаціонарності системи застосовано ПІ-регулятор, що реалізована в середовищі Simulink.

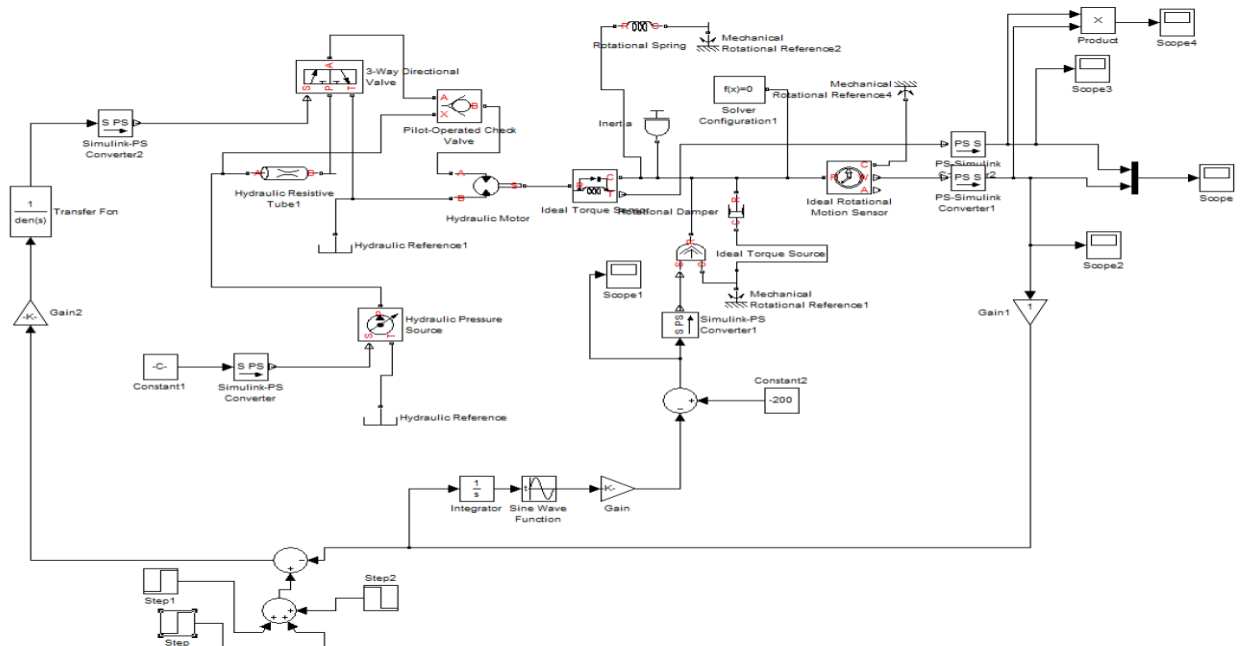


Рисунок 3.6- Модель імітації системи керування робочим органом асфальтоукладача з використанням аналогового ПІ-регулятора

Дискретний «ПІ-регулятор є фундаментальним компонентом комп'ютеризованої платформи контролю та керування комплексом операцій з формування якісного асфальтобетонного полотна, що забезпечує контроль та оптимальну стабілізацію параметрів укладання. Функціональне призначення цього інтелектуального модуля полягає в реалізації алгоритмів динамічного регулювання експлуатаційних характеристик укладального комплексу для формування однорідного шару дорожнього полотна із заданими геометричними параметрами» [24]. Цифрова система керування зображена на рисунках 3.7.

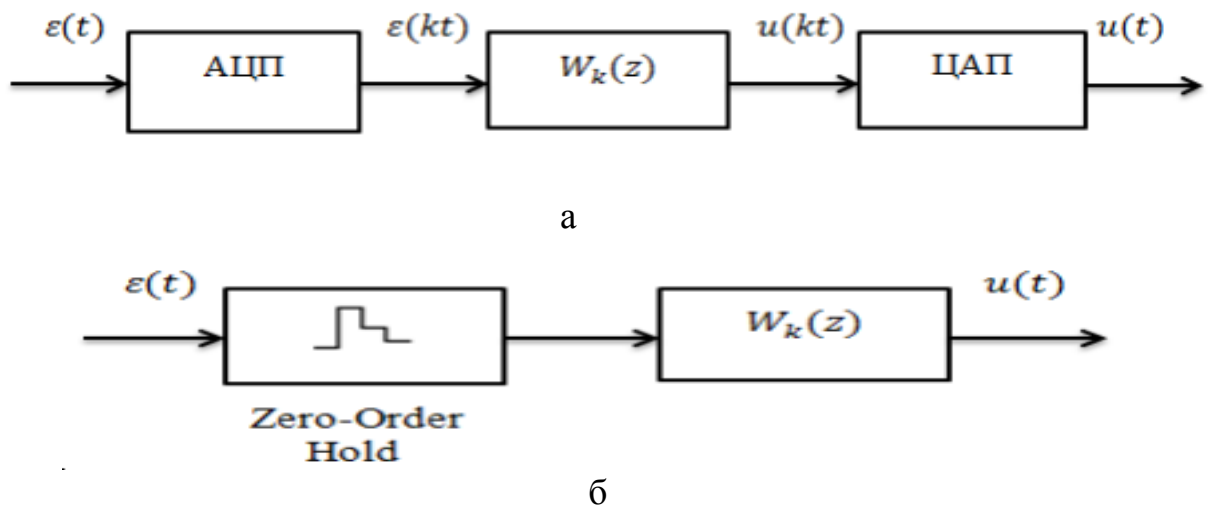


Рисунок 3.7- Схема цифрового регулятора(а), та його MATLAB&Simulink модель (б)

Вхідний «інтерфейс регулятора реалізований у вигляді АЦП, що конвертує безперервний сигнал похибки в двійковий код для подальшої обробки регулятором. Вихідний інтерфейс представлений ЦАП, який перетворює отриманий від регулятора двійковий код у напругу, необхідну для керування об'єктом» [24]. Параметри цифрового ПІ-регулятора визначаються так: пропорційна частина залишається сталою, а інтегральна розраховується за формулою (3.22):

$$W_i(z) = \frac{T * z}{z - 1}, \quad (3.22)$$

Для реалізації цифрового ПІ-регулятора необхідно визначити період дискретизації T . Оптимальне значення T вибирається з урахуванням

динамічних характеристик об'єкта управління та вимог до швидкодії системи. Відобразимо, що період дискретизації рівний T . Тоді передатна функція дискретного ПІ-регулятора:

$$W_k(z) = \frac{(K_p + T) * z - K_p}{z - 1}, \quad (3.23)$$

Звідси

$$K_p + T = 0,09,$$

$$K_p = 0,08.$$

Різницеве рівняння, що описує зв'язок між похибкою регулювання (входом) $\varepsilon(k \cdot T)$ та керуючим впливом (виходом) $u(k \cdot T)$, матиме вигляд (3.24):

$$u(k \cdot T) = u((k - 1) \cdot T) + (K_p + T) * \varepsilon(k \cdot T) - K_p \varepsilon((k - 1) \cdot T), \quad (3.24)$$

На рисунку 3.8 відображена розроблена модель, що відповідає цифровому ПІ-регулятору системи керування асфальтоукладача.

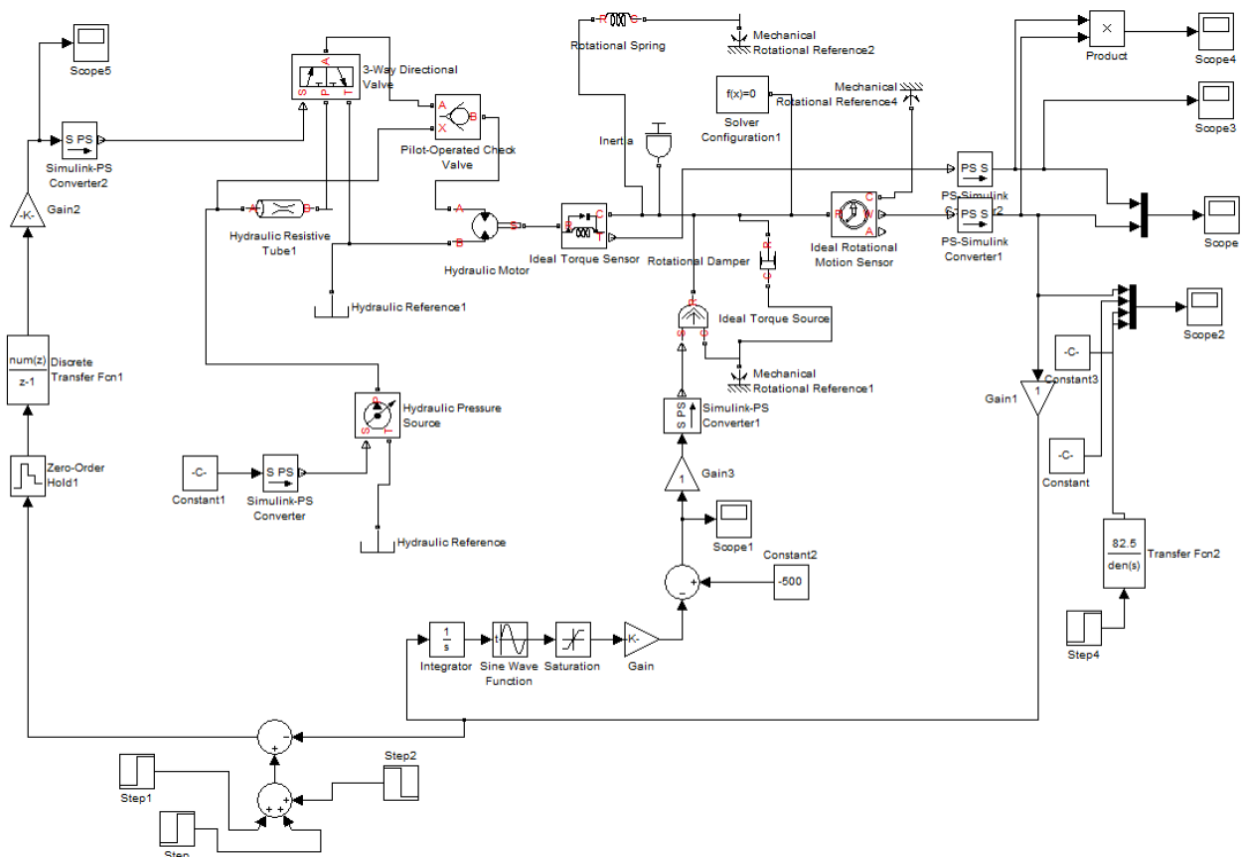


Рисунок 3.8-Розроблена модель імітації системи керування робочим елементом асфальтоукладача, що використовує цифровий ПІ-регулятор

Якість керування робочим процесом визначається точністю ідентифікації параметрів нелінійної моделі, реалізованої в Simulink, а також ефективністю синтезованого цифрового регулятора при дії зовнішніх збурень.

При моделюванні системи з аналоговим ПІ-регулятором на комп'ютері, ми отримали графіки, що описують, як змінюються різні параметри з часом. Ці графіки можна побачити на рисунках 3.9, 3.10 та 3.11. На рисунку 3.9, рожевий колір показує, як змінюється кутова швидкість гідравлічного двигуна, а синій – як змінюється момент цього двигуна.

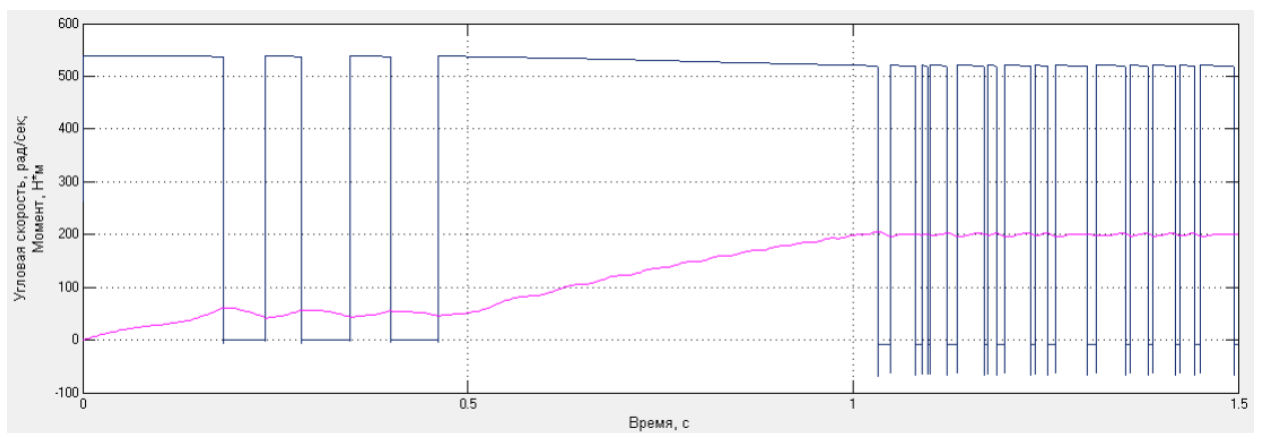


Рисунок 3.9- Процес варіації кутової швидкості та моменту гідромотора під дією аналогового керуючого сигналу

На рисунку 3.10 відображе, як відбувається зміна потужності гідравлічного двигуна в часі.

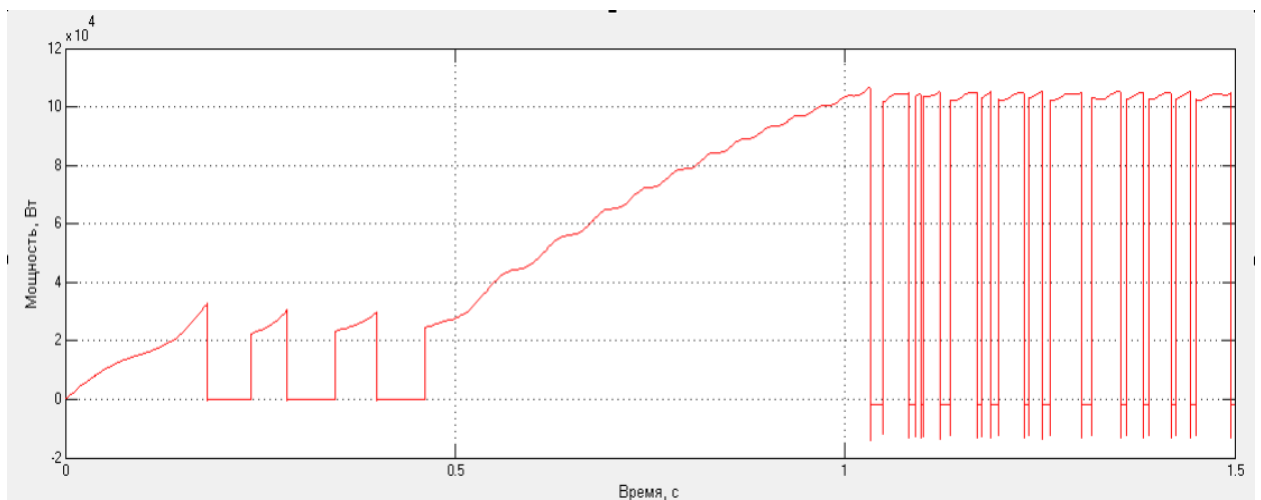


Рисунок 3.10- Зміна потужності гідромотора асфальтоукладача в часі в аналоговій системі керування

На рисунку 3.11 показано зміни моменту навантаження гідравлічного двигуна в часі.

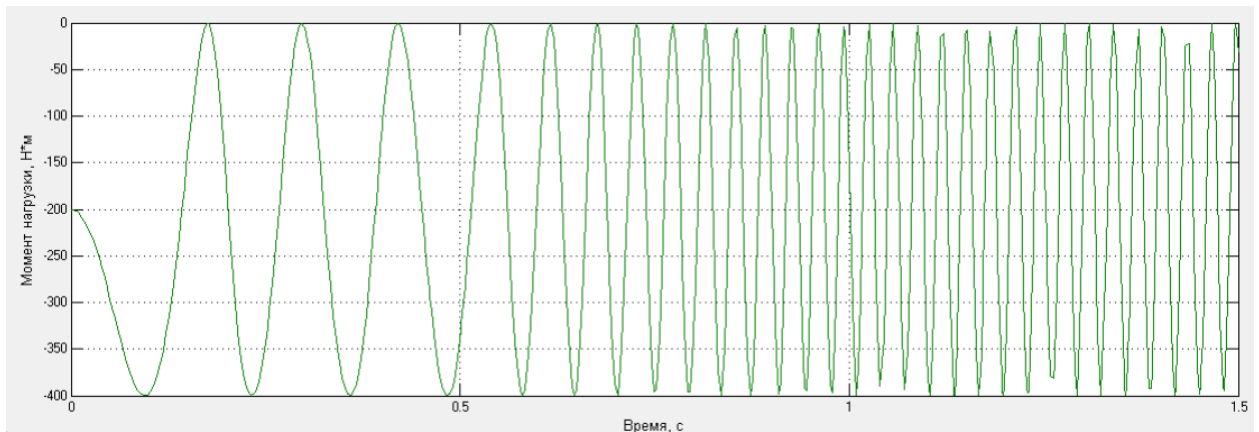


Рисунок 3.11 – Зміна моменту навантаження гідромотора в часі в аналоговій системі керування

Моделювання необхідне для визначення динамічних характеристик та характеру динамічних процесів, що проходять в технологічному процесі вкладання асфальту. За результатами моделювання можна стверджувати, що перерегулювання не спостерігається в жодній з систем керування. Час перехідного процесу значно менший за 1.

3.3 Розробка нейрон-нечіткої моделі регулятора параметрів технологічного процесу вкладання асфальту

Для покращення ефективності керування технологічного процесу вкладання асфальту, а також доцільно використовувати нечітке регулювання, яке забезпечує гнучке налаштування операційних параметрів платформи відповідно до динамічних факторів навколишнього середовища та специфіки виконання робіт. Нейро-нечітке регулювання може бути ще більш ефективним, оскільки поєднує можливості нейронних мереж і нечіткої логіки, що дозволяє обробляти складніші і неструктуровані дані для досягнення оптимальних результатів.

Автоматичне налаштування регулятора із застосуванням нечіткої логіки починається з визначення початкових значень коефіцієнтів регулятора

на основі періоду власних коливань у замкнутій системі. Передавальна функція цієї системи обчислюється за формулою (3.23) і має вигляд, представлений у формулі (3.24).

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1}, \quad (3.23)$$

$$W_d(s) = \frac{82,5}{\frac{1,04}{3}s + 1}, \quad (3.24)$$

На рисунку 3.12 зображено схему моделювання системи керування робочим вузлом асфальтоукладача, що використовує нечіткий ПІ-регулятор, створену в середовищі MATLAB.

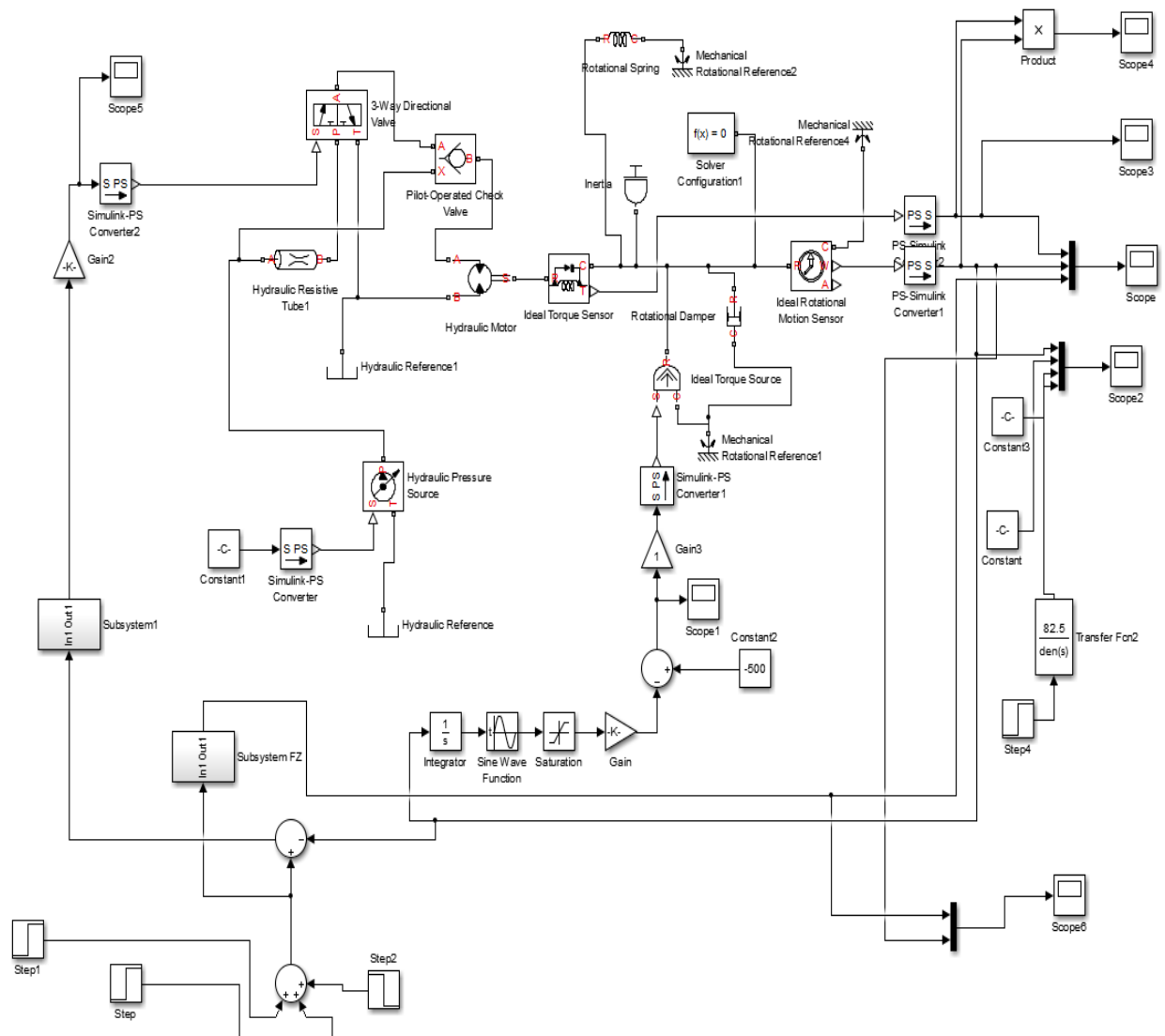


Рисунок 3.12-Імітаційна модель для керування робочим механізмом асфальтоукладача, що використовує цифровий та нечіткий ПІ-регулятором

Де структуру нечіткого регулятора розроблено в Simulink та представлено на рисунку 3.13.

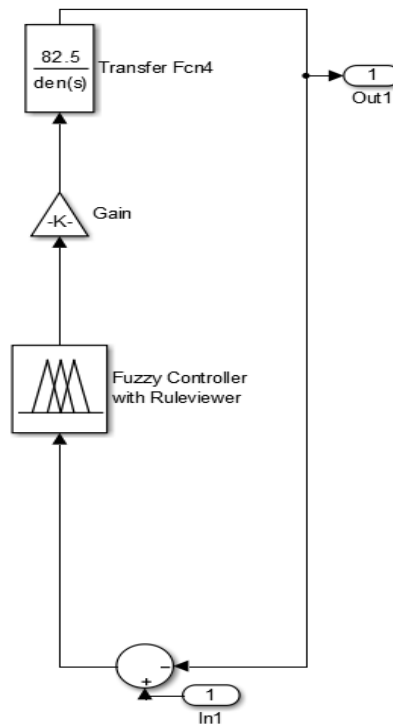


Рисунок 3.13-Модель нечіткого регулятора

Використовуючи FIS-редактор, можна створювати нові системи нечіткого виведення. Цей потужний інструмент призначений для розробки, збереження, завантаження та друку систем нечіткої логіки (рисунок 3.14).

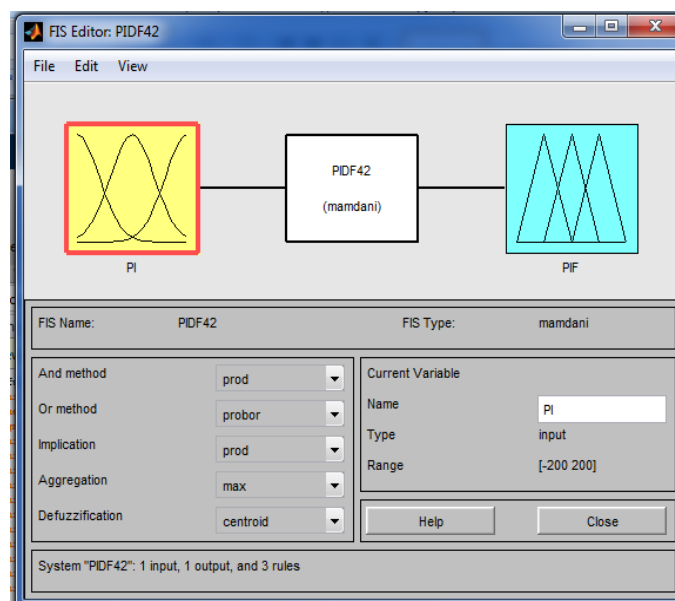


Рисунок 3.14-Вікно Fis-editor

У редакторі «функції приналежності» (рисунк 3.15) можна налаштувати різноманітні параметри для термів вхідних та вихідних змінних системи нечіткого логічного виведення:

- кількість термів;
- назви термів;
- типи та параметри функцій приналежності

Функції приналежності відображають лінгвістичні терми як нечіткі множини, дозволяючи системі ефективно моделювати нечіткі та розпливчасті поняття. Використання Редактора функцій приналежності є важливим етапом у розробці і налаштуванні систем, заснованих на нечіткій логіці. Він дозволяє глибоко налаштувати систему відповідно до специфіки предметної області та вимог користувача» [26].

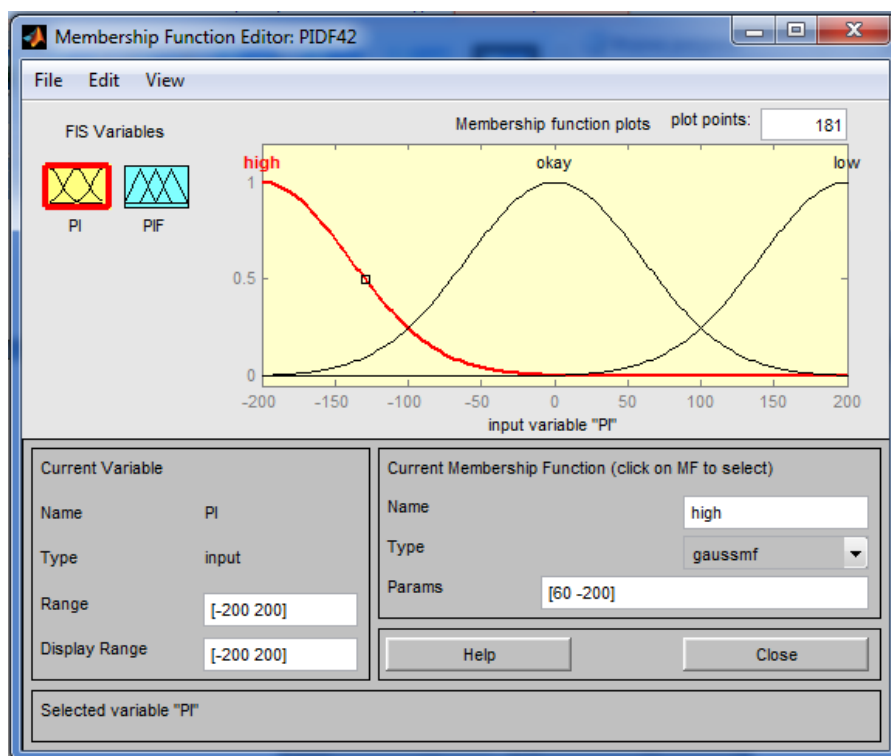


Рисунок 3.15- Функція приналежності змінної ПІ

Щоб додати нове правило в нашу систему, потрібно описати його на спеціальній мові, використовуючи прості слова та логічні зв'язки. Ми вибираємо, які умови повинні бути виконані, щоб правило спрацювало, і яке буде наслідком. Крім того, ми можемо вказати, наскільки ми впевнені в

цьому правилі. Після цього нове правило автоматично додається до нашої бази знань (рисунок 3.16).

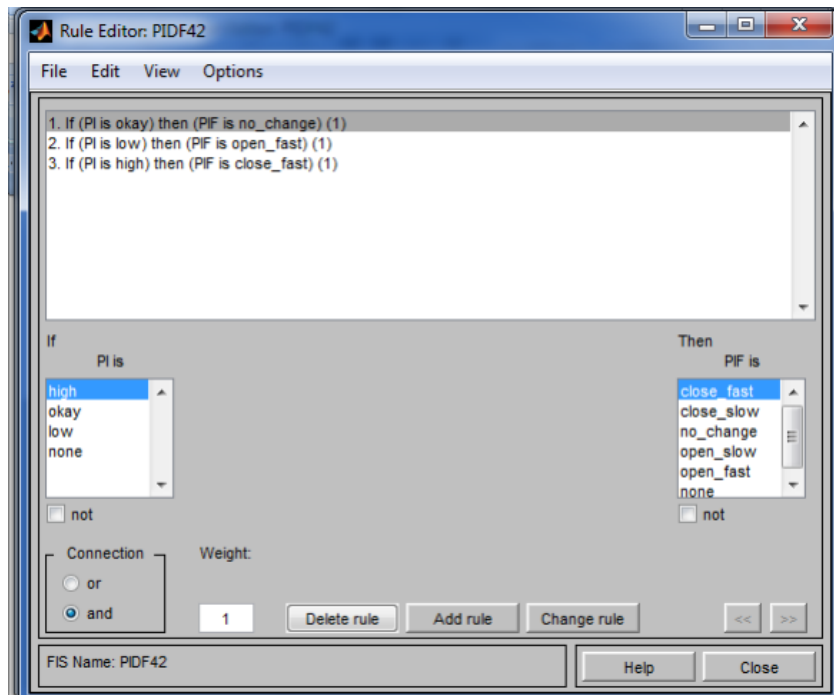


Рисунок 3.16-База знань

Для візуалізації механізму прийняття рішень на основі системи нечіткого логічного виведення застосовуємо спеціалізований інструментальний засіб - інтерактивний візуалізатор правил (Rule Viewer рисунок 3.17). Цей аналітичний модуль забезпечує покрокове відстеження та детальний аналіз процесу трансформації вхідних даних через систему нечітких правил у вихідні керуючі впливи.

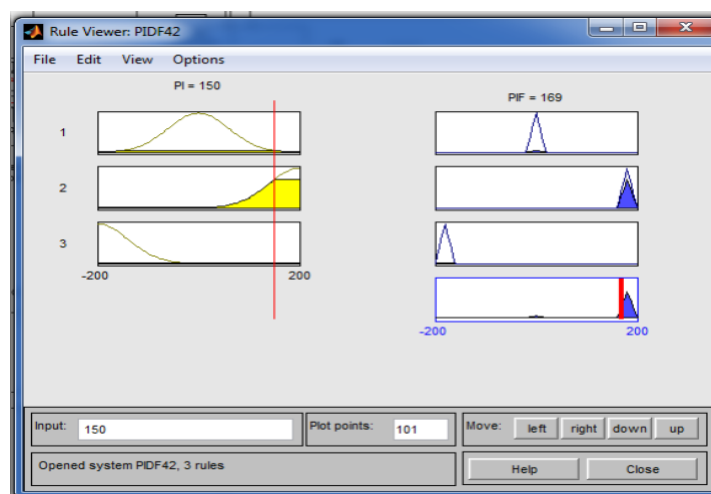


Рисунок 3.17 – Інтерактивна візуалізація механізму нечіткого логічного виведення в середовищі RuleViewer

Використання «адаптивної нейро-нечіткої системи виведення, поєднує методи нечіткої логіки та штучних нейронних мереж (ANFIS) використовується для вирішення завдань прогнозування, класифікації, керування та ідентифікації систем, що робить її ефективним інструментом для систем керування технологічними процесами, зокрема для процесу вкладання асфальту. ANFIS здатна будувати інтелектуальні моделі, що враховують такі змінні, як температура асфальту, швидкість укладання, тиск та інші критичні фактори, які можуть бути нечіткими або неточними. Архітектура: ANFIS працює на основі нечіткої системи типу Sugeno, що складається з п'яти шарів, де кожен шар виконує певну функцію У застосуванні до керування процесом вкладання асфальту ці шари можуть забезпечувати контроль за станом устаткування, підтриманням стабільності температурного режиму, керуванням швидкістю укладання та іншими показниками» [27].

Було проведено моделювання систем автоматичного керування (САУ) (рисунок 3.18) з різними типами регуляторів: цифровим, аналоговим, нейро-нечітким А-регулятором та нейро-нечітким D-регулятором. Метою дослідження було порівняння ефективності цих регуляторів та визначення оптимального варіанту для управління щільністю асфальтобетонних сумішей.

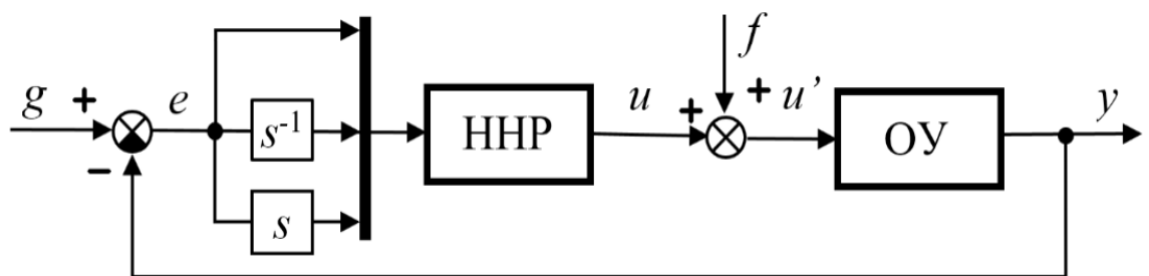


Рисунок 3.18- Схема САУ з нейронечітким ПІД-регулятором

Перехідні характеристики всіх САУ, за винятком системи з цифровим регулятором $h(t)$, демонструють високу точність відпрацювання. Максимальне відхилення точок від еталонного значення не перевищує 1%.

Особливо варто відзначити САУ з нейро-нечіткими D-регуляторами, які показали повне співпадіння з еталоном у п'ятивідсотковій зоні.

-цифровий регулятор $h(t)$: Відрізняється від інших систем більшим відхиленням (до 10%) та часом регулювання 1,3 с.;

-аналоговий та нейро-нечіткий А-регулятори: Характеризуються перерегулюванням 5% та часом регулювання 1,55 с.;

-цифровий та нейро-нечіткий D-регулятори: Демонструють найкращі показники: перерегулювання 2% та час регулювання 1,8 с (рисунок 3.19).

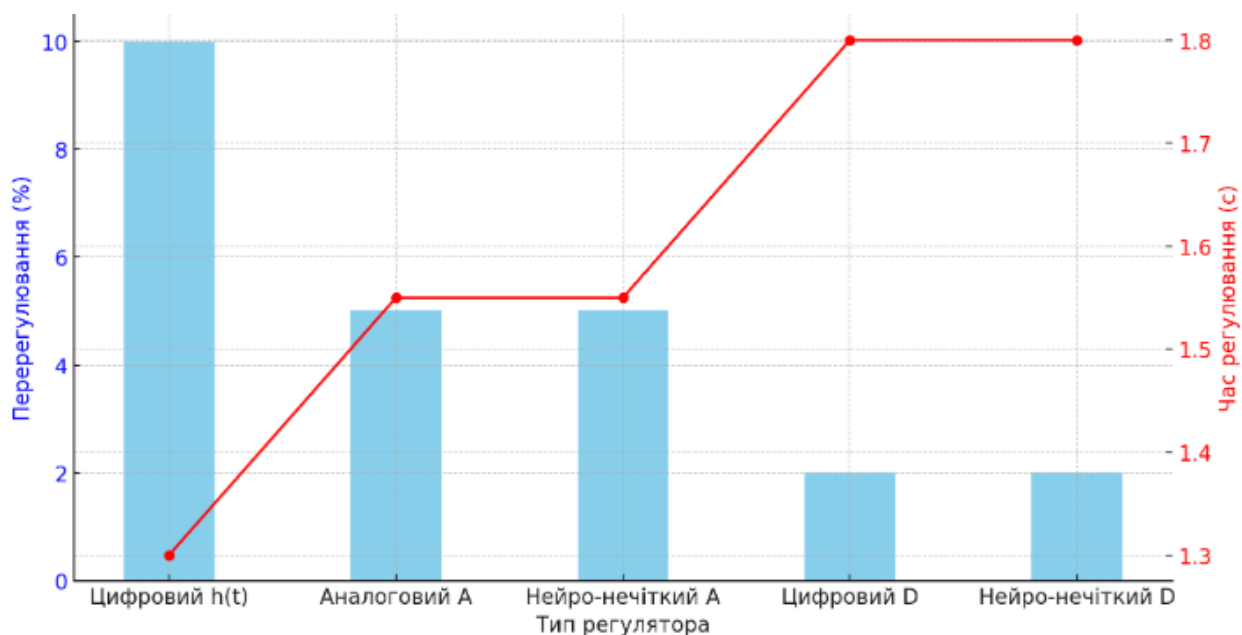


Рисунок 3.19- Характеристики регуляторів

Результати моделювання підтверджують високу ефективність управління щільністю асфальтобетонних сумішей за допомогою нейро-нечітких регуляторів. Системи з нейро-нечіткими D-регуляторами показали найкращі результати за точністю та швидкістю відпрацювання. Це свідчить про те, що поєднання нейронних мереж та нечіткої логіки є перспективним підходом, для розробки інтелектуальних самоналагоджувальних комплексів автоматизованого моніторингу та оптимізації виробничих операцій.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі здійснено детальний аналіз робочого процесу асфальтоукладача; розроблено функціональну схему системи керування робочим механізмом асфальтоукладача; синтезовано параметри аналогового, цифрового та нечіткого ПІ-регулятора, а також нейро-нечіткої моделі регулювання, яка забезпечує адаптацію до змін умов роботи; розроблено імітаційні моделі аналогової, цифрової, нечіткої та нейро-нечіткої системи керування робочим органом асфальтоукладача в середовищі MATLAB&Simulink, виконано комп'ютерне моделювання системи керування робочим механізмом асфальтоукладача у відповідних діапазонах змінних.

Результати комп'ютерного моделювання свідчать про наступне: відсутність перерегулювання; час стабілізації перехідного процесу значно менший за одиницю; забезпечено незалежність кутової швидкості гідравлічного двигуна від основних збурень, причому зміна моментів не впливає на кутову швидкість.

Основна перевага нейро-нечіткої моделі регулювання полягає в її здатності адаптуватися до непередбачуваних змін у робочому середовищі, що підвищує стабільність та надійність управління. Ефективність отриманих результатів підтверджується працездатністю створених моделей у середовищі Simulink і результатами тестування на задавальні впливи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація укладання асфальту за допомогою сенсорних систем / J. Smith, P. Johnson // *International Journal of Road Construction Technology*, Vol. 12, No. 4, 2023. - p.100-105.
2. Сучасні технології дорожнього будівництва / М.П. Ляшко, І.В. Кравець // Збірник матеріалів конференції «Цифровізація в інфраструктурі», Львів, 2022. - с.40-45.
3. Xinqiang Zhang, Yongsheng Yao, Yi Peng. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning / *Sensors*, Vol. 24, No. 9, 2024. – p. 2777.
4. Fernando Aucejo Esteban, Rodrigo E. Rodríguez. Development of Self-Sensing Asphalt Pavements: Review and Perspectives / *Sensors*, Vol. 24, No. 3, 2024. – p. 792.
5. Benjamin Schmidt, Matthias Rath. Automation in Asphalt Paving: New Approaches Using Digital Twins and AI / *Proceedings of the International Conference on Road Construction*, Berlin, 2024. – p. 85-92.
6. David Torres. Real-Time Control Systems for Asphalt Paving Operations / *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 150, 2023. – p. 101-108.
7. Wei Liu, Jing Zhao. Advancements in Automated Asphalt Paving Technologies: A Comprehensive Overview / *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol. 14, No. 4, 2024. – p. 299-310.
8. IoT Solutions for Asphalt Paving Process Automation / M. Brown, L. Taylor // *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 3, 2022. - p.200-210.
9. Бондар О.М. Використання автоматизованих комплексів у дорожньому будівництві / О.М. Бондар, В.М. Соловей // *Праці конференції «Сучасні аспекти будівельної техніки»*, Харків, 2023. - с.19-25.
10. Machine Learning-Based Control in Asphalt Paving / K. Lee, H. Park // *Springer Proceedings in Construction Engineering*, 2023. - p.80-88.

11. Кравчук С.В. Інноваційні методи автоматизації в дорожньому будівництві / С.В. Кравчук, Л.О. Губінський // Збірник наукових праць ХНУБА, Харків, 2024. - с.50-55.
12. Development of Digital Twin Technology in Road Construction / F. Garcia, R. Lopez // Elsevier Science, 2022. - p.145-150.
13. Цифрові інструменти управління дорожньою технікою / І.М. Сидоренко, Л.В. Кулик // Збірник наукових праць ОДАБА, Одеса, 2023. - с.35-40.
14. Artificial Intelligence for Paving Systems Optimization / N. Patel, J. Green // MDPI Smart Cities Journal, 2022. - p.220-230.
15. Сучасні методи контролю якості укладання асфальту / Ю.П. Сорока, А.В. Дорошенко // Матеріали конференції «Дорожнє будівництво: виклики сучасності», Чернівці, 2024. - с.12-18.
16. Innovations in Asphalt Paving Equipment / D. White, R. Zhang // Taylor & Francis Construction Journal, 2023. - p.85-90.
17. Підвищення ефективності дорожньої техніки за допомогою автоматизації / О.А. Харченко // Збірник наукових праць КПІ, Київ, 2023. - с.42-47.
18. Автоматизовані системи управління дорожньою технікою / М.Ю. Ткаченко, В.О. Клим // Збірник конференції «Технології майбутнього», Дніпро, 2023. - с.27-32.
19. Real-Time Monitoring in Asphalt Paving Processes / A. Kumar, J. Smith // IEEE Transactions on Automation, 2023. - p.190-195.
20. Кузьменко О.В. Інтеграція цифрових технологій у дорожньому будівництві / О.В. Кузьменко // Праці наукового семінару «Інновації у будівництві», Київ, 2024. - с.20-25.
21. Implementation of Robotics in Asphalt Paving Systems / S. Astani, M. Gupta // ScienceDirect, 2023. - p.75-80.
22. BIM Integration for Road Construction Automation / K. Chen, L. Wu // MDPI Journal of Civil Engineering, 2022. - p.65-70.

23. Дорошенко А.В. Принципи автоматизації контролю дорожніх покриттів / А.В. Дорошенко, С.М. Іванюк // Збірник матеріалів «Дорожні технології», Київ, 2023. - с.15-20.
24. Automated Asphalt Paver Systems: Challenges and Advances / J. Taylor, P. Roy // Springer Construction Technology Journal, 2021. - p.90-95.
25. Сучасні системи автоматичного контролю дорожнього укладання / Л.О. Іванченко // Матеріали конференції «Інновації в будівництві», Львів, 2023. - с.30-35.
26. Advanced Paving Techniques Using AI / R. Sharma, K. Patel // IEEE Journal of Engineering Technology, 2022. - p.130-135.
27. Сорока Ю.П. Автоматизована система управління технологічним процесом вкладання асфальту / П.В. Гуменний, А.С. Гриців, Б.В. Романюк, Ю.П. Сорока // Збірник матеріалів науково-практичного симпозиуму «Технології Інтернету речей: системи та рішення» (TIP СТ - 2024), Тернопіль, 2024. - с.14-19.

ДОДАТОК А

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОБОЧИМ МЕХАНІЗМОМ АСФАЛЬТОУКЛАДАЧА, ЩО ВИКОРИСТОВУЄ ЦИФРОВИЙ ТА НЕЧІТКИЙ ПІ-РЕГУЛЯТОРОМ

