

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра автоматизації та комп'ютерно - інтегрованих технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
магістра

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДОРОЖНІМИ МАШИНАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ  
СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.



О.Г. Гурко

Нормоконтролер, канд. техн. наук., доцент

І.Г. Ільге

Керівник, канд. техн. наук., доцент



А.Б.Біньковська

Студент гр. МА-61-24

О.О. Гнатенко

Харків - 2025

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
(назва вузу)

Факультет механічний


Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень магістр

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою

 О.Г.Гурко

"1" вересня 2025 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Гнатенку Олексію Олександровичу

1. Тема роботи: «Система керування дорожніми машинами з використанням супутникових навігаційних систем»

Керівник роботи Бінковська Анжела Борисівна, канд техн. наук., доц.

Затверджені рішенням Вченої ради механічного факультету від «05» вересня 2025 р. № 1



2. Строк подання студентом роботи 01.12.2025 р.

3. Вхідні дані до роботи: супутникові навігаційні системи; будівельно-дорожні машини з використанням GPS-навігаторів.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: Вступ; 1 Супутникова система навігації; 2 GPS технології в сільському господарстві; 3 Колісна машина як об'єкт керування; висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1 Постановка задачі; 2 Схеми роботи системи GPS; 3 Система паралельного водіння; 4 Застосування автопілотів; 5 Структурна схема руху колісної машини; 6 Машинна схема моделювання кута повороту  $\varphi$  передніх коліс; 7 Машинна схема моделювання лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії; 8 Машинна схема моделювання системи керування; 9 Висновки.

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Основна частина	канд.техн.наук., доц. Біньковська А.Б.	01.09.2025 р. 	01.12.2025 р. 

7. Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Найменування етапів кваліфікаційної роботи (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Супутникова система навігації	17.09-01.10	10%
2	GPS технології в сільському господарстві	02.10-15.10	40%
3	Колісна машина як об'єкт керування	16.10-30.10	80%
4	Формування висновків по роботі. Оформлення дипломної роботи	01.11-12.11	90%
5	Підготовка презентації та доповіді	13.11-01.12	100%

Студент

\_\_\_\_\_

О.О. Гнатенко

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

А.Б. Біньковська

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 61 сторінка, 27 рисунків, 3 таблиці, 37 джерел, 1 додаток.

ДОРОЖНІ МАШИНИ, GPS-ПРИЙМАЧ, НАЗЕМНИЙ СЕГМЕНТ, СУПУТНИКОВА НАВІГАЦІЯ, СИСТЕМИ ПАРАЛЕЛЬНОГО ВОДІННЯ, АВТОПЛОТИ, МОДЕЛЮВАННЯ, СИНТЕЗ, ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС

Об'єкт - процес керування роботою будівельно-дорожніх машин з використанням GPS-навігаторів.

Предмет – система керування роботою будівельно-дорожніх машин з використанням GPS-навігаторів.

Мета роботи – підвищення ефективності роботи будівельно-дорожніх машин з використанням GPS-навігаторів.

Задачі:

- провести аналіз супутникової навігаційної системи;
- розглянути колісну машину як об'єкт керування;
- скласти структурну схему руху колісної машини;
- скласти машинну схему моделювання кута повороту передніх коліс;
- скласти машинну схему моделювання лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії;
- розробити машинну схему моделювання системи керування;
- провести моделювання.

Задачі дослідження вирішити методами аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

У роботі були розглянуті глобальні системи позиціонування, принципи роботи й функції системи GPS. Розглянуто застосування супутникової навігації при роботі дорожніх машин, описано інноваційні GPS технології в сільському господарстві. Проведено моделювання кута повороту передніх коліс і лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії.

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Супутникова система навігації.....	9
1.1 Система GPS.....	9
1.2 Класифікація супутникових систем навігації.....	15
1.3 Засоби визначення координат об'єкта.....	17
1.4 Системи керування роботою дорожніх машин.....	20
2 GPS технології в сільському господарстві.....	27
2.1 Системи паралельного водіння.....	30
2.2 Автопілоти.....	33
2.3 Види автопілотів.....	34
3 Колісна машина як об'єкт керування.....	37
3.1 Рівняння динаміки колісної машини.....	37
3.2 Моделювання в MATLAB.....	50
Висновки.....	57
Перелік посилань.....	58
Додаток А. Ілюстративний матеріал.....	62

## ВСТУП

У сучасних умовах цифрової трансформації дорожньо-будівельної галузі автоматизація процесів керування дорожніми машинами набуває особливого значення. Точність виконання технологічних операцій, зменшення людського фактору та підвищення продуктивності є ключовими факторами ефективності дорожнього будівництва. Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку таких систем є використання супутникових навігаційних технологій [1].

Глобальні навігаційні супутникові системи дають змогу в режимі реального часу визначати координати дорожньої машини з високою точністю та використовувати ці дані для автоматичного або напівавтоматичного керування робочими органами. Це особливо важливо для грейдерів, бульдозерів, асфальтоукладачів і катків, де потрібна точність у межах кількох сантиметрів [2].

Крім того, сучасні системи керування часто інтегрують модулі телеметрії та дистанційного моніторингу, що дозволяє контролювати роботу машини та її стан у режимі реального часу з центрального офісу або мобільного пристрою. Це забезпечує своєчасне виявлення технічних несправностей, оптимізацію маршрутів та планування технічного обслуговування, підвищуючи загальну ефективність і безпеку дорожньо-будівельних робіт.

Завдання точного визначення географічного розташування біля була актуальна ще з давніх часів. Мореплавці минулого у світлий час доби орієнтувалися Сонцем, а вночі — зі зірками. Маючи дані про небесні координати світил і обчислюючи їх висоту над горизонтом і кут, вони могли визначити своє місце розташування та приблизну дистанцію до пункту призначення. Однак погодні умови нерідко заважали таким спостереженням, через що існував ризик відхилитися від обраного курсу.

З винаходом компаса - найпростішого пристрою з магнітною стрілкою, встановленої на осі, - навігація значно спростилася. Мандрівники стали набагато менше залежати від погодних умов. На початку ХХ століття з'явився гірокомпас,

який застосовується на великих морських судах. Цей точний та надійний прилад, на відміну від звичайного компасу, показує напрямок на географічний полюс, а не на магнітний.

Однак Сонце, зірки і навіть компас не можна вважати цілком надійними орієнтирами. Небесні світила можуть ховатися за туманом, а робота компаса порушується під час магнітних бур. З такою проблемою особливо довго стикалася авіація, якій була потрібна універсальна навігаційна система, яка не залежить від природних факторів. В результаті з'явилися різні види навігації: повітряна, наземна, космічна та інерційна.

Автомобільна навігаційна система (АНС) є одним із напрямків наземної навігації.

Автомобільна навігаційна система є різновидом наземної навігації, орієнтованим на використання в транспортних засобах. Її основне завдання - забезпечити водія точною інформацією про місцезнаходження автомобіля, маршрут прямування, дорожню обстановку і можливі перешкоди. На відміну від традиційних орієнтирів, АНС працює в автоматичному режимі та здатна функціонувати незалежно від погодних умов, часу доби чи видимості дороги.

Сучасні автомобільні навігаційні комплекси поєднують дані від супутникових систем, картографічних баз та датчиків автомобіля, що дозволяє не тільки визначати поточне положення, а й прогнозувати рух, рекомендувати оптимальний маршрут, враховувати пробки, дорожні роботи та інші фактори.

Таким чином, АНС стала важливим елементом системи безпеки та комфорту у наземному транспорті.

Навігаційні системи у дорожньо-будівельних машинах займають ключове місце у сучасних технологіях управління будівельними процесами. Їх застосування дозволяє суттєво підвищити точність виконання робіт, скоротити час будівництва та зменшити вплив людського фактору. Такі системи забезпечують визначення просторового становища машини, контроль траєкторії руху та автоматизацію операцій, пов'язаних із плануванням, профілюванням та укладанням матеріалів.

Основою навігації у дорожньо-будівельній техніці найчастіше є супутникові системи позиціонування, включаючи GPS, Galileo та BeiDou. У поєднанні з інерційними датчиками, лазерними нівелірами та тахеометрами вони формують комплексне навігаційне середовище, здатне забезпечувати точність до міліметрів при виконанні особливо важливих завдань, наприклад, при керуванні автогрейдером, асфальтоукладачем або бульдозером.

Сучасні навігаційні комплекси інтегруються із системами автоматичного управління робочими органами. Це дозволяє машині підтримувати необхідну висоту, ухил, товщину шару чи контур поверхні без постійного втручання оператора.

Для оператора навігаційна система є інструментом, що надає візуалізовану інформацію: цифрові карти, 3D-моделі проекту, відхилення від проектної лінії та рекомендації щодо коригування руху. Застосування навігаційних технологій також сприяє підвищенню безпеки на будівельному майданчику. Оператор заздалегідь отримує інформацію про зони обмеження, підземні комунікації, небезпечні ділянки та запрограмовані маршрути. Це знижує ймовірність аварійних ситуацій та незгоджених переміщень техніки.

Таким чином, навігаційні системи у дорожньо-будівельних машинах є важливим елементом цифровізації будівельних процесів, забезпечуючи високу точність, ефективність та безпеку виконання дорожньо-будівельних робіт.

# 1 СУПУТНИКОВА СИСТЕМА НАВІГАЦІЇ

## 1.1 Система GPS [3]

GPS технологія дозволяє використовувати можливості супутникової навігації. Диспетчер або бортовий комп'ютер, знаючи точні координати об'єкта, можуть легко прорахувати оптимальний маршрут до будь-якого потрібного місця. Таким чином, GPS навігація на авто дозволяє ефективно організувати вантажоперевезення, координувати дії й стежити безпосередньо за кожним автомобілем. Системи супутникової навігації дозволяють визначати координати об'єкта, що рухається, з точністю до декількох метрів. Також GPS навігація важлива для своєчасної допомоги потерпілим, як на суші, так і в морі або заблукавшим туристам.

GPS навігація має наступні переваги [4]:

- моніторинг місця розташування й поточного стану об'єктів, що рухаються, методами й технологіями супутникової навігації;
- управління бортовою апаратурою об'єктів, що рухаються;
- спостереження за рухомими об'єктами, перевірка правильності виконання поставлених маршрутних завдань;
- статистика пройденої відстані;
- диспетчеризація об'єкта;
- історія раніше зроблених поїздок;
- відправлення даних на борт об'єкта;
- підтримка інформаційно-довідникової системи за об'єктами, що рухаються;
- виведення звітів.

Встановлюючи на об'єкт GPS-приймач, ви можете проводити моніторинг (постійне спостереження) таких об'єктів як яхта, катер, залізничний вагон, машина. Транспортні компанії можуть визначати точне положення всіх своїх



шляхом передачі текстових повідомлень на бортові термінали, автоматичного розподілу заявок на найближчі автомобілі.

Основні можливості такої системи:

- автоматизація всього процесу роботи із заявкою;
- комунікація з водіями за допомогою бортових терміналів;
- автоматичний розподіл заявки на найближчі до місця заявки вільні автомобілі таксопарку;
- візуальний контроль над пересуванням автомобілів на електронній карті, як у режимі реального часу, так і в запису.

Для роботи системи необхідна комп'ютерна мережа, у якій, крім робочих місць персоналу, встановлюються сервера зберігання й обробки даних. Система автоматизації побудована на моделі "клієнт-сервер". Комунікація з автомобілями здійснюється з диспетчерського пункту централізовано за допомогою спеціального виділеного сервера. Диспетчера й інший персонал працюють із водіями зі своїх робочих місць, які взаємодіють із сервером. Для роботи диспетчерського центра розроблене спеціальне програмне забезпечення.

Для визначення географічного місця розташування, курсу й швидкості автомобілів використовується супутникова навігація GPS. Для обміну даними між диспетчерською й автомобілем, у цей час, можливо використовувати два варіанти: радіоканал діапазону високих частот і протокол пакетної передачі даних, можливість використання якого зараз надають практично всі провайдери мобільного зв'язку.

За допомогою запропонованої системи можлива:

- організація системи оперативного радіозв'язку диспетчера з бортами;
- організація служби передачі заявок від диспетчера на борт;
- організація спостереження за місцем розташування й станом бортів у реальному часі на електронній карті місцевості;
- організація контролю перевезень пасажирів з урахуванням станом таксометра;
- організація системи охорони автомобіля під час відсутності водія;

- організація системи електронної обробки заявок і контролю над їхнім виконанням.

### 1.1.1 Склад системи GPS [5-7]

Система GPS містить у собі три фундаментальні складові:

- космічний сегмент;
- наземний сегмент;
- GPS-приймач.

Космічний сегмент, показаний на рисунку 1.2, являє собою 24 супутника, що перебувають на 6 різних кругових орбітах, які відстоять друг від друга на 60 градусів. Супутники рухаються по орбітах радіусом 22 200 кілометрів зі швидкістю 11 тисяч кілометрів у годину й роблять один оберт навколо Землі за період, приблизно рівний 12 годинам. Всі вони щодня повторюють свою траєкторію з "запізненням" в 4 хвилини.



Рисунок 1.2 - Космічний сегмент системи GPS

Вага кожного супутника близько 900 кг, розмір більше 5 м, включаючи сонячні батареї. На кожному супутнику встановлені атомні годинники, що забезпечують високу точність ( $10^{-9}$  сек.), обчислювально - кодуючий пристрій і передавачі потужністю 50 Вт і 8 Вт, що випромінюють на частотах  $L1 = 1575,42$  МГц та  $L2 = 1227,60$  МГц.

В ідеалі в будь-який момент часу будь-яка точка Земної кулі перебуває в зоні видимості не менш трьох супутників. Супутники можна "побачити" навіть на полюсах, правда вони будуть перебувати низько над горизонтом, що впливає на точність вимірів, але несуттєво.

Також варто відзначити, що є все-таки "темні" області у високих широтах, де одночасно може перебувати не більше 2 супутників, що не дозволяє визначати координати й порушує роботу приймача GPS. Однак це триває лише від 15 до 45 хвилин, в іншому - система навігації GPS дійсно глобальна.

Наземний сегмент контролюється Міністерством Оборони США. Він складається з п'яти контрольно-вимірювальних станцій, які перебувають на Гавайях, на Кваджалейне, на острові Вознесення, у Дієго-Гарсія й Колорадо-Спрингс, чотирьох станцій зв'язку й центра керування всією системою, розташованого на авіабазі в Шривере, штат Колорадо.

Станції спостереження безупинно контролюють рух космічних апаратів і передають інформацію в центр керування. У центрі обчислюють уточнені елементи супутникових орбіт і коефіцієнти поправок шкал часу. Ці дані надходять по каналах станцій зв'язку на супутники не рідше, ніж один раз у добу.

GPS-приймач - третій сегмент системи навігації, що позиціонується й дозволяє обчислювати географічні координати на основі отриманих даних, він обробляє сигнали із супутників і тим самим обчислює координати.

### 1.1.2 Принцип роботи системи GPS [5-7]

В основі роботи системи GPS лежить принцип супутникової трилатерації. Відповідно до цього принципу, координати об'єкта на поверхні Землі можуть бути обчислені по вимірах відстаней до супутників.

Принцип роботи системи досить простий. GPS-приймач опитує групу супутників, наявних у видимості приладу (для визначення координат досить 3-х супутників) і на основі отриманої інформації видає положення на місцевості. Тому що положення супутників у просторі відомо, GPS-приймач посилає сигнал на кожний із трьох супутників, і одержує відстань до кожного. По цих відстанях

визначаються три сфери. Перетинання цих сфер дає 2 точки (представлено на рисунку 1.3), але тому що одна з них буде перебувати або над, або під землею, то залишається одна крапка, яка і є координатою людини на поверхні землі.

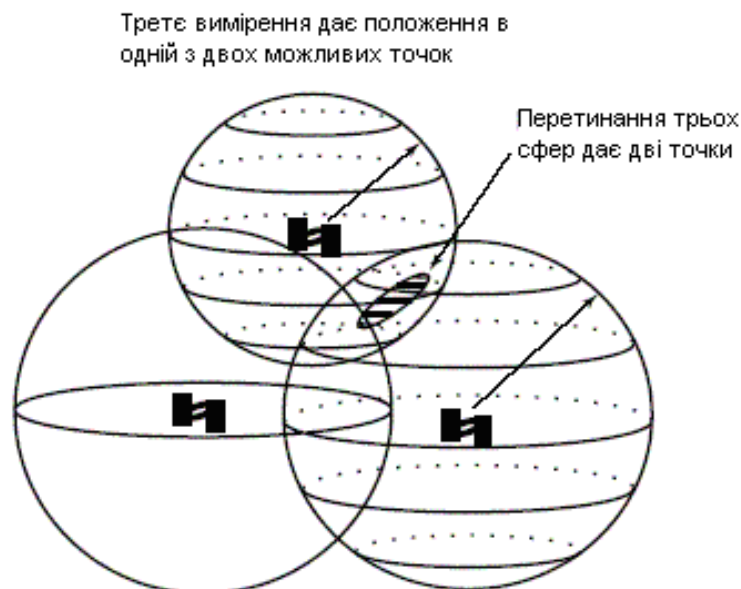


Рисунок 1.3 - Перетинання трьох уявлених сфер

Таким чином, одержавши сигнал як мінімум від трьох супутників, ми можемо обчислити координати будь-якої крапки поблизу поверхні Землі. Щоб проводити настільки якісні обчислення, необхідно користуватися дуже точними годинниками, адже розбіжність у часі всього в 1 тисячну частку секунди дасть помилку місця розташування близько 300 км. На борті супутників установлені атомні годинники. Кожний супутник має їх не менше 4, щоб можна було гарантувати, що хоча б одні працюють обов'язково. Спосіб виміру часу заснований на атомному стандарті частоти, який забезпечує хід бортових годинників супутника з наносекундною точністю. А це 0,000000001 секунди!

Більшість GPS-навігаторів здатні прийняти сигнал одночасно від 12 супутників. Цього цілком достатньо для рішення більшості задач. Однак у цей час у продажі з'явилися 14-и і навіть 18-канальні приймачі. Але одночасно прийняти сигнал навіть від 12 супутників дуже складно. Для цього необхідно перебувати на відкритому місці, причому саме супутникове сузір'я (тобто положення супутників

на небокраї) повинне бути сприятливе. Прийняти ж сигнал відразу від 18 супутників у цей час просто неможливо, тому що частина з них схована й перебуває по іншу сторону земної кулі.

### 1.1.3 Основні функції й можливості GPS [8]

GPS має наступні дуже важливі функції й можливості:

- автоматичне прокладання оптимального маршруту;
- супроводження по маршруту (попередження про всілякі перебудування);
- визначення координат;
- визначення швидкості руху. За допомогою GPS приймача можна визначити відхилення від номінальної швидкості. Або, наприклад, ви поставили колеса більшого радіуса або профілю, тепер можна буде визначити, на скільки зміниться реальна швидкість, адже й пробіг буде зовсім іншим;
- визначення часу до прибуття - може визначатися як по лінійній залежності від швидкості, так і аналізуючи вже пройдену ділянку;
- визначення довжини маршруту - точна відстань між двома об'єктами;
- пошук об'єкта за адресою або за типом;
- одержання інформації про пробки й коректування маршруту, а також багато чого іншого.

## 1.2 Класифікація супутникових систем навігації [9-12]

Супутникові системи навігації бувають:

- система NAVSTAR;
- система BEIDOU;
- система GALILEO.

### 1.2.1 Система NAVSTAR

Система навігації GPS, що функціонує на базі орбітального групування супутників NAVSTAR є на сьогоднішній день єдиною системою глобального

позиціонування, що працює в повному обсязі. Система GPS належить і контролюється Міністерством Оборони США.

Навігаційні супутники NAVSTAR рухаються по кругових орбітах у шести орбітальних площинах, що відстоять друг від друга на 60 градусів. Вага одного супутника - 787 кг, розмір - 5 м. Висота орбіт становить 20180 км над земною поверхнею. Супутники передають сигнали в діапазонах:  $L1=1575,42$  МГц і  $L2=1227,6$  МГц, а останні модернізовані супутники - також на частоті  $L5=1176,4$  МГц. Навігаційні дані можуть бути прийняті й оброблені за допомогою GPS-приймача.

### 1.2.2 Система BEIDOU

Beidou (Велика Ведмедиця) - глобальна система супутникової навігації, розробкою якої займається Китай. Передбачається, що ця система буде сумісна з американською системою GPS і європейською системою Galileo.

Як GPS, Galileo і китайська система Beidou буде доступна безкоштовно для всіх бажаючих. Але буде передбачено і зашифрований канал для авторизованих користувачів - наприклад, для військових.

Архітектура системи навігації Beidou передбачає наявність п'яти супутників на геостационарній орбіті і 30 супутників на орбіті середньої дальності. Сигнал загального користування дозволить отримати точність позиціонування у 10 м, визначення швидкості руху у 0.2 м/с, а визначення поточного часу - з точністю 50 нс. Розгортання китайської системи викликає невдоволення у господарів трьох інших навігаційних систем.

### 1.2.3 Система GALILEO

Galileo High Accuracy Service (HAS) є інноваційним компонентом європейської супутникової навігаційної системи Galileo, розробленим з метою надання користувачам послуг високоточної навігації. Цей сервіс забезпечує покращену точність визначення місцеположення, досягаючи показників в декілька сантиметрів, що становить значний прогрес порівняно з традиційними

навігаційними системами, які зазвичай пропонують точність на рівні метрів [12].

Початкові капіталовкладення в систему Galileo нараховують близько 1,1 мільярда євро. Усього заплановано виведення на орбіту 30 супутників у період до 2010 року включно. Повністю програма повинна обійтися Європі в 3 мільярди євро, включаючи вартість інфраструктури на Землі. Планується, що система буде безкоштовна для всіх, але точні сигнали будуть передаватися за гроші.

Після уведення в лад системи GALILEO на Землі будуть незалежно функціонувати дві навігаційні супутникові системи, кожна з яких буде обслуговувати як свій порівняно невеликий контингент авторизованих користувачів, так і велику кількість громадянських споживачів. Останні зможуть скористатися послугами обох систем, що значно підвищить точність і оперативність визначення місця розташування об'єкта.

### 1.3 Засоби визначення координат об'єкта

#### 1.3.1 GPS приймач [13,14]

GPS приймач - це пристрій, який приймає сигнали від навігаційних супутників і піддає їх мінімально необхідній обробці для того, щоб забезпечити відповідно до встановленого стандарту (протоколом) передачу в комп'ютер, де ці сигнали будуть поєднані з картою й будуть перетворені для нашого зручного сприйняття. GPS приймач, оснащений Bluetooth, робить обмін даними із КПК по каналу Bluetooth.

Основа GPS приймача становить антена й чипсет - спеціальна мікросхема, яка робить необхідну обробку сигналів.

Точність визначення координат GPS приймачами (навігаторами) становить у будь-яку погоду й у будь-якій крапці земної кулі біля 5-15 метрів. Постійно відслідковуючи Ваше місце розташування протягом деякого часу, GPS-приймач також може розрахувати швидкість і напрямок вашого руху. Платити за використання такої системи доводиться тільки платникам податків США.

Розглянемо, як здійснюється процес визначення координат приймачем.

При включенні GPS приймача після досить довгої перерви (так званий "холодний старт"), приймач починає приймати сигнал із супутників і визначати, які саме супутники із всього угруповання доступні із цього місця розташування. Група супутників, бачимих у даній точці називається "альманахом". Після вимикання, GPS приймач якийсь час тримає в пам'яті останній альманах і у випадку повторного включення після короткочасної перерви, час, необхідний для прийому сигналів і розрахунку координат значно знижується ("гарячий старт").

Приймач, одержуючи із супутників точний час (яке останні супутники чітко синхронізують між собою), по затримках обчислює фізичні відстані до них (швидкість поширення радіохвилі відома). Маючи у видимості три або більше супутників, приймач, методом триангуляції, мабуть, одержує можливість визначити своє точне положення в 2D-просторі. Маючи у видимості чотири або більше супутників, приймач може також визначити й висоту абонента над рівнем моря, яка, щоправда, обчислюється із свідомо більшою погрішністю, ніж координати на земній поверхні.

Спосіб радіообміну між супутниками й GPS-приймачем досить незвичайний. Справа в тому, що всі супутники віщають одночасно на одній і тій же частоті. Для того, щоб GPS-приймач міг визначити, від якого супутника виходить дана інформація, бортові передавачі посилають у складі свого сигналу стандартний ідентифікаційний код, який рівняється з кодами, які перебувають у пам'яті приймача. Таким чином, незалежно від того, скільки і які супутники перебувають у полі зору приймача, останній може без труднощів ідентифікувати джерела сигналів. Такий підхід сильно полегшує схему GPS-приймача.

Очевидно, що чим більше супутників приймач має можливість опитати й чим більше рознесені ці супутники на небесній півсфері, тим більше точними будуть його показники. На даний момент точність визначення координат будь-якими GPS-приймачами при нормальних умовах становить не більше 5-15 метрів.

Крім координат, GPS-приймач надає й іншу корисну інформацію: максимальну й середню швидкість руху; сторони світла; кінцеву крапку маршруту й час, через який в ній можна опинитися.

GPS-приймач у сукупності з комп'ютером, що обробляє навігаційні сигнали, у загальному випадку являє собою розподілену систему, що часто називають GPS навігатором. Такий навігатор може мати винесену антену або безпосередньо приймач GPS сигналів може розташовуватися окремо від пристрою, у якому дані такого приймача використовуються.

Однак часто використовують замість GPS навігатора термін GPS приймач. Частіше тоді, коли в одному пристрої розташована антена, пристрій обробки сигналу, комп'ютер і пристрій відображення.

Моделі GPS приймачів, що сьогодні випускаються, можна підключати до настільного або кишенькового комп'ютера (КПК), що дозволяє завантажувати в електронні карти й крапки планованого маршруту, а також зчитувати по закінченні подорожі пройдену трасу.

Все це базові функції, є і у найпростіших, і у більше складних пристроїв. У другому випадку ми маємо більше широкі картографічні можливості й додаткові властивості. Наприклад, в GPS навігатор можуть вбудовуватися: барометричний висотомір, магнітний компас (напрямок на північ у звичайному GPS приймачі визначається тільки при русі по прямій лінії), звуковий сигнал, підтримка картриджів розширення пам'яті, а також розрахунок часу сходу й заходу сонця, ведення календаря, калькулятор мисливця й рибалки й інше, як в GPS навігаторів компанії Garmin.

Наприклад, GPS приймач в автомобілі, підключений до КПК із встановленою GPS програмою й картами, майже повністю знімає з водія турботу про вибір напрямку руху. Звукові й візуальні підказки супроводжують Вас на маршруті. Якщо Ви випадково проїхали необхідний поворот, то новий маршрут з раніше обраною кінцевою крапкою буде побудований автоматично.

Сучасні GPS приймачі діляться на:

- одноканальні;
- багатоканальні.

Одноканальним GPS приймачам доводиться здійснювати послідовно захоплення кожного GPS супутника. По цьому каналу здійснюється як

спостереження за супутниками, так і передача технічної інформації про стан супутника й системи в цілому.

Багатоканальні GPS приймачі працюють більш ефективно, ніж одноканальні. Багатоканальні GPS приймачі використовують кілька каналів для спостереження за декількома супутниками одночасно. В ідеальних умовах, зі стаціонарно розташованим GPS приймачем, коли немає ніяких перешкод, закриваючих видимість супутників, багатопроменевого перевідображення або інших факторів зниження точності, різниця практично буде непомітна. Однак у реальних умовах, коли GPS приймач пересувається разом з Вами або сигнал від супутників може перериватися, GPS приймач із більшим числом каналів буде працювати краще.

Розглянемо основні технічні характеристики GPS-приймачів, які приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Технічні характеристики GPS-приймачів

	Портативні	Автомобільні	Морські	Авіаційні
Кількість шляхових точок	500	3500	3000	3000
Кількість маршрутів	20	70	50	50
Дозволяюча здатність екрана	480 × 320 px	480 × 320 px	320 x 320 px	480 × 320 px
Час роботи	22 години	20 годин	10-15 годин	15 годин

#### 1.4 Системи керування роботою дорожніх машин

Системи керування роботою дорожніх машин дозволяють виконувати різні грабарства в автоматичному режимі завдяки використанню компонентів, які наведено в таблиці 1.2 [15].

Таблиця 1.2 - Основні компоненти систем керування роботою дорожніх машин

Рисунок	Назва	Призначення
1	2	3
Система керування бульдозером [15-17]		
	Leica iCON iGD2 - система 2D	Проста в роботі та багатофункціональна 2D-система управління, розроблена для полегшення і значного підвищення ефективності земляних робіт за допомогою бульдозера. Система дозволяє використовувати кілька значень висотних відміток і нахилів в будь-якій орієнтації без переорієнтування машини або скидання еталонної висоти лазерного рівня.
	Leica iCON iGD3 - 3D	Сучасне рішення для бульдозера з широким набором функцій. Система нівелювання iCON iGD3 дозволяє працювати по цифровій 2D або 3D моделі, завантаженої в систему проекту віддалено з офісу або з USB флеш-накопичувача, і задавати проектну поверхню, можна приступати до профілювання.
	LEICA iCON gps 80 - GNSS приймач для управління будівельною технікою	Машинний приймач Leica iCON gps 80 GNSS - чудовий помічник у всіх рішеннях управління машинами. Використовуючи високу точність приладу (до сантиметра), гнучкість і сучасні технологічні рішення, ви можете гарантувати підвищення продуктивності машини й ефективності робіт, що виконуються на майданчику.
	Лазерний приймач Leica MLS720	Лазерний приймач Leica MLS720 є оком системи. Датчик отримує обертовий промінь лазерного світла та вказує його положення під час удару по датчику. Потім ця інформація передається в електронному вигляді на панель керування. Датчик забезпечує п'ять різних положень лазерного променя. Використовуються для автоматичного або ручного керування, миготливі світлодіодні ліхтарі ідеально підходять для всіх програм керування машиною

## Закінчення таблиці 1.2

1	2	3
Система керування автогрейдером [18-19]		
	<p>Leica MSS1300 датчик нахилу</p>	<p>інструмент точного вимірювання, призначений для використання в системах керування машинами, що забезпечує точний моніторинг нахилу або кутів нахилу в режимі реального часу в різних будівельних і геодезичних програмах. Цей датчик ідеально підходить для проектів, які вимагають точного контролю градації одного схилу, таких як дорожні роботи, земляні роботи та будівництво фундаменту.</p>
	<p>Датчик обертання Leica MRS1300, універсальний</p>	<p>Спеціалізований датчик, призначений для точного вимірювання та моніторингу обертальних рухів у різноманітних системах керування машиною та геодезії. Цей датчик обертання особливо корисний у ситуаціях, які вимагають точного моніторингу кутів і рухів обладнання, наприклад, у будівельній техніці або системах позиціонування.</p>
Система керування екскаватором [20]		
	<p>Leica MSS400 -датчики нахилу</p>	<p>Створені для того, щоб забезпечити найвищу продуктивність і перевести рівень екскаваційних робіт на новий рівень ефективності</p>
Система керування асфальтоукладальником [21]		
	<p>3D система автоматичног о управління асфальтоукла дачем</p>	<p>Дозволяє досягти більшої ефективності асфальтування для реалізації великих дорожньо-будівельних проектів, коли асфальтне полотно дороги повинно бути постелено швидко і якісно</p>

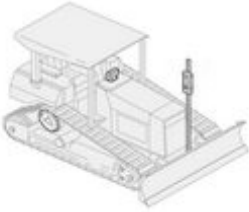
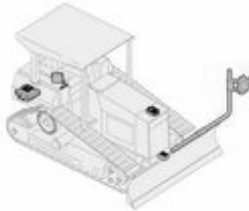
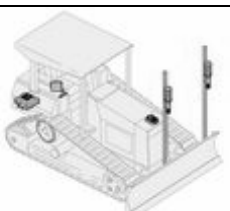
## 1.4.1 Системи керування бульдозерами [22]

Системи компанії TOPCON, розроблені для бульдозерів, дозволяють

виконувати попередні грабарства в автоматичному режимі з контролем поперечного ухилу й висоти відвалу з безпрецедентною точністю  $\pm 2$ см.

Конфігурації систем 2D керування бульдозерами наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Конфігурації систем 2D

	Індикаторна система з лазерним датчиком
	Автоматична система з ультразвуковим датчиком і датчиком нахилу
	Автоматична система з лазерним датчиком і датчиком нахилу
	Автоматична система із двома лазерними датчиками й датчиком нахилу

Системи 2D керування бульдозерами складаються з лазерного датчика, блоку керування й гідроклапанів, найбільш ефективні при підготовці рівних поверхонь. А комплект найпростішої індикаторної системи з ручним керуванням відвалу полягає всього з одного лазерного датчика, що вже дає значне збільшення ефективності і якості грабарств.

Для реалізації більших і складних проектів ідеально підходить система 3D GPS. Під час роботи координати відвалу постійно порівнюються із завантаженими в бортовий комп'ютер проектними даними. Керування відвалом повністю бере на себе автоматика. Інформація про роботу системи й про

положення бульдозера на об'єкті видається на дисплей, розміщений у кабіні водія.

#### 1.4.3 Системи керування автогрейдером [23]

Розроблені компанією TOPCON системи керування автогрейдером являють собою універсальний інструмент, що поєднує можливості контролю відвалу по висоті й поперечному ухилу, у єдиний комплекс, що забезпечує профілювання дорожнього покриття й підготовку складних поверхонь в автоматичному режимі. Модульність систем керування автогрейдером дозволяє підібрати оптимальний комплект і згодом його модернізувати для виконання певного виду робіт.

По способу завдання проекту на місцевості системи підрозділяються на 2D і 3D.

Використання 2D систем вимагає закріплення на місцевості проектних напрямків і оцінок. Для цього використовуються монтажні струни, що фіксують напрямок робіт, що й копіюють положення проектного профілю, або лазерні споруджувачі площини, що створюють на об'єкті рівні опорні поверхні: горизонтальні або з ухилами по двом напрямкам.

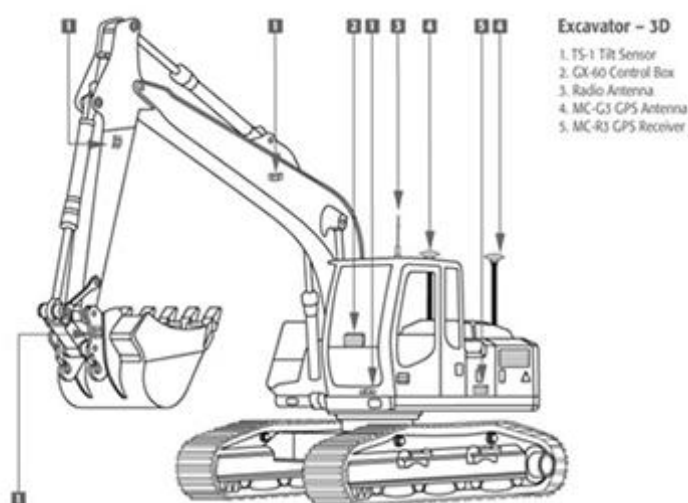
Грейдер, оснащений системою 3D, може вільно переміщатися по всьому робочому об'єкту, автоматично створюючи проектну поверхню на місцевості з точністю 1-2 см по плану й по висоті з витримкою проектних ухилів. При цьому робота може виконуватися в будь-який час доби. У даний момент компанією TOPCON пропонуються два типи систем 3D: 3D LPS і 3D GPS вимірювальних засобів, що використовують у якості основних, відповідно роботизовані електронні тахеометри GRT-2000 і приймачі сигналів супутників GPS.

#### 1.4.4 Системи керування екскаватором [24, 25]

Торсон приносить майбутнє управління машиною вам сьогодні з доступною системою X-53 3D для екскаваторів. X-53 3D Excavator від Торсон надає оператору всю інформацію, необхідну для прискорення виконання завдань з розкопок. На відміну від систем лазерних екскаваторів, X53 дозволяє оператору

“see” точно розташувати свою машину по відношенню до місця, забезпечуючи точне позиціонування над центральними лініями комунальних послуг. У режимі реального часу оператор також може бачити положення зубів ковша порівняно з конструкцією обробки, яка дуже корисна для глибоких розрізів, сліпих розкопок або під час роботи навколо конструкцій.

Розглянемо стандартну схему розташування компонентів системи на екскаваторі (рисунок 1.4) [25].



1 – датчик нахилу; 2 - блок керування; 3 - радіоантена; 4 - GPS-антена;  
5 - GPS-приймач

Рисунок 1.4 - Розташування компонентів системи 3Dхі на екскаваторі

Переваги систем керування:

- кілька видів (план, профіль, розріз) відображають положення ковша, рукояті, стріли та всієї машини в режимі реального часу;
- простий у використанні кольоровий індикатор вирізки/засипання для миттєвої перевірки ухилу;
- опорна точка висоти дозволяє контролювати ухил ліворуч, праворуч або посередині ковша;
- можливість змінювати ковші на ходу.

#### 1.4.5 Системи керування асфальтоукладальниками [26]

Повністю безконтактні системи керування асфальтоукладальниками, розроблені компанією TOPCON, призначені для виконання асфальтування з автоматичним контролем поперечного ухилу, рівності й товщини покриття з точністю  $\pm 1,5$  міліметра по висоті. При підготовці рівної поверхні, у якості джерела проектних оцінок використовуються лазерні інструменти, здатні формувати лазерну площину на більших відстанях.

На робочому органі асфальтоукладальника встановлюється датчик на спеціальній штанзі, що постійно передає на бортовий комп'ютер інформацію про своє положення щодо лазерної площини, пов'язаної із проектом. При виявленні вертикального зсуву датчика разом з робочим органом бортовий комп'ютер виробляє коригувальний сигнал у систему гідроприводу для повернення робочого органа в проектне положення. В інших випадках використовуються акустичні датчики, що працюють за принципом далекоміра. З їхньою допомогою виконується точне копіювання проектного профілю, закріпленого на місцевості за допомогою монтажних струн. За допомогою датчика нахилу виконується контроль поперечного ухилу підготовлюваного покриття. Бортовий комп'ютер виконує роль блоку керування й налаштування системи, акумулює інформацію, одержувану із усіх датчиків, виконує миттєвий аналіз відповідності поточного полотна проекту й необхідне коректування в положення робочого органа машини.

Особливості й переваги:

- безперервність роботи ( без зупинки);
- жорсткий контроль над витратою матеріалів;
- виключення постійного польового контролю укладання;
- поліпшення сглаженості профілю дороги;
- економія палива й моторесурсу техніки.

## 2 GPS ТЕХНОЛОГІЇ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Багато років успішність управління сільськогосподарською технікою при рядовій обробці ґрунту і посівів визначалася поєднанням двох тісно пов'язаних чинників: професійною підготовкою механізатора і наявністю надійних орієнтирів, задаючих напрям руху по полю. При цьому істотну роль грали як рівень кваліфікації і практичний досвід оператора, так і якість використовуваних орієнтирів - технологічна колія, встановлені віхи, розмітка піною і інші засоби.

Поява у кінці ХХ століття супутникових навігаційних технологій стало переломним моментом в організації руху різних видів транспорту — літаків, судів, автомобілів і т. д. Ці зміни повною мірою торкнулися і машин, вживаних в аграрному секторі.

У сільському господарстві отримали широке впровадження і підтвердили свою ефективність два типи GPS- устаткування, призначеного для управління тракторами і комбайнами : системи паралельного водіння і автоматичні пілоти.

Використання супутникової навігації стало можливим завдяки установці на техніку спеціального приймача, який безперервно прочитує сигнали про положення навігаційних супутників і відстань до них. Устаткування, що забезпечує зв'язок з супутниками і визначення координат, дістало назву GPS-приймачів. На їх основі створений широкий спектр систем, призначених для автоматизації управління рухом сільгоспмашин.

На точність визначення місцерозташування впливає кілька основних факторів [28]:

- тимчасові неузгодженості;
- кількість одночасно спостережуваних супутників;
- варіації орбіт супутників;
- атмосферна інтерференція;
- багатопроменеве поширення сигналу й інше.

Тимчасові неузгодженості. Власні годинники супутника й приймача мають

різну точність і не можуть бути абсолютно синхронізовані. Тому що вимір відстані виконується побічно, через вимір часу проходження сигналу від супутника до приймача, тому невеликі помилки виміру часу можуть привести до значних помилок виміру відстані. Для задовільної роботи систем паралельного водіння необхідне стійке приймання сигналу мінімум із чотирьох супутників.

Варіації орбіт. Орбіти супутників розраховуються з великою точністю, тому можна передбачити положення супутника в кожний момент часу. Але, через зовнішні збурювання в космічному просторі або через системні коректування, реальна орбіта супутника може трохи відрізнятися від розрахункової, що відбивається на точності одержуваних приймачем даних про положення супутника.

Конфігурація супутників. Взаємне розташування супутників, що відслідковуються приймачем, постійно змінюється в міру їх руху по орбітах. Наприклад, якщо всі супутники, що відслідковуються, «згрупувалися», тоді розрахунки будуть давати більші погрішності. Конфігурація супутників оцінюється параметром ослаблення точності. У загальному випадку, коли параметр ослаблення точності менш чотирьох, приймач GPS забезпечує достатню точність визначення місця розташування. Чим більше супутників перебуває в зоні видимості приймача, тим більша точність визначення координат буде забезпечуватися.

Атмосферна інтерференція. Земна атмосфера впливає на швидкість проходження радіохвиль. Атмосфера найбільше впливає на сигнали із супутників, розташованих низько над обрієм, тому в GPS - приймачах передбачена можливість ігнорування сигналів від таких супутників. Користувач сам може встановити мінімально припустимий кут розташування супутників над обрієм.

Багатопрореневе поширення сигналів. Такий ефект відбувається, коли той самий сигнал ухвалюється в різні моменти часу через різні шляхи проходження. Наприклад, приймач може прийняти сигнал безпосередньо із супутника, а через якийсь час той же сигнал, відбитий від даху будинку. Новітні моделі GPS - приймачів, що використовують спеціальні методи фільтрації, успішно

мінімізують подібні помилки.

Збільшення точності визначення місця розташування досягається за допомогою диференціального виправлення.

Диференціальне виправлення – це дані, які можуть надходити на приймач GPS від різних джерел і дозволяють підвищити точність визначення місця розташування до декількох сантиметрів. Таке виправлення позначається аббревіатурою DGPS, а приймач, який може приймати таке виправлення – GPS - приймачем.

Диференціальний режим забезпечується за допомогою контрольних навігаційних приймачів, які називаються базовими станціями. Порівнюючи власні відомі координати (отримані в результаті прецизійної геодезичної зйомки) з обмірюваними координатами, базова станція формує виправлення, які передаються споживачам по каналах зв'язку (радіоканал, стільниковий зв'язок GSM, супутниковий зв'язок). Замовник може підбирати для себе джерело одержання диференціальних виправлень, виходячи з типу GPS приймача, який він застосовує в обладнаннях паралельного водіння, і вартості одержання виправлення. Такими джерелами можуть бути супутники диференційної системи GPS (рисунок 2.1) [29] або локальна базова станція (рисунок 2.2) [30].

Висока точність позиціонування техніки на полі – ключовий аспект роботи курсовказівника та системи автопілотування.

У звичайному автономному режимі GPS-сигнал дозволяє отримувати дані з точністю від 5 метрів. В аграрному виробництві це занадто велика похибка.

Для отримання сантиметрової точності сигнал GPS коригується, наприклад, за допомогою диференціального режиму диференційної системи GPS.

Суть роботи диференційної системи GPS полягає у використанні двох приймачів. Один з них – мобільний – встановлюється на тракторі. Інший – наземна, або «базова» станція – постійно знаходиться у точці з відомими координатами. Саме дані, отримані наземною станцією, використовуються для корекції сигналу мобільного апарату [30].

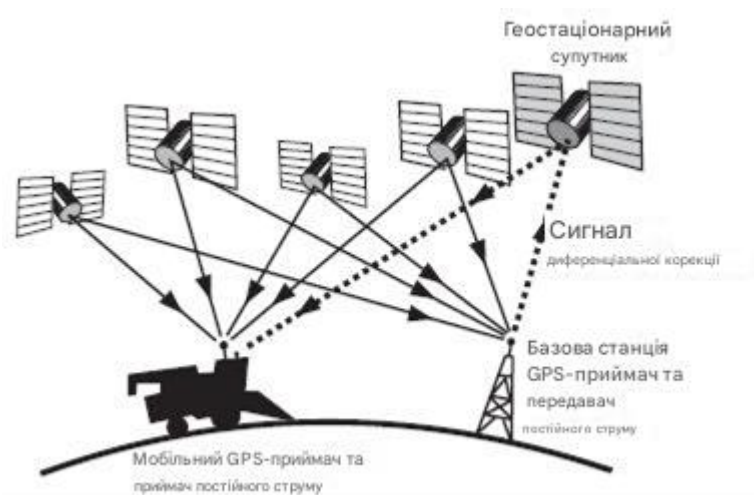


Рисунок 2.1 - Схема роботи приймача, встановленого на тракторі, та який одержує диференціальне виправлення від супутника диференційної системи GPS

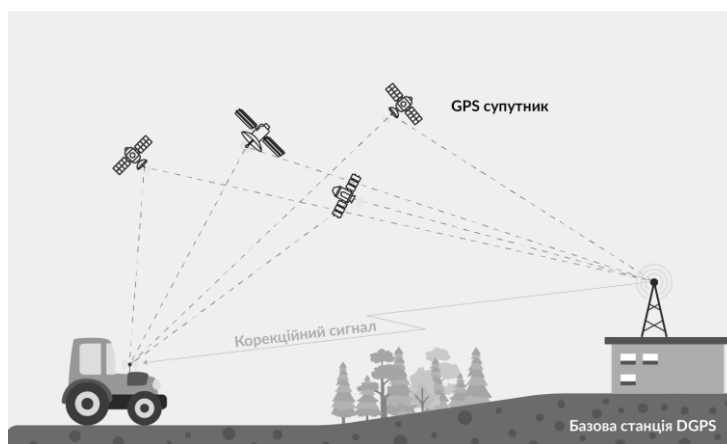


Рисунок 2.2 - Схема роботи базової станції диференційної системи GPS

У сучасних тракторах про рівномірність і ефективність роботи опікуються разом комп'ютер і супутник. Допомога водія потрібна тільки в позаштатних ситуаціях.

## 2.1 Системи паралельного водіння [31]

Застосування системи паралельного водіння на тракторах сприяє підвищенню продуктивності та скорочення витрат. Завдяки автоматизованому управлінню та точному позиціонуванню, сільгосптехніка може працювати більш ефективно, знижуючи час виконання завдань та збільшуючи площу обробки. Це

дозволяє скоротити витрати на паливо, час та трудовитрати, що є значною економічною перевагою для сільськогосподарських підприємств.

Система паралельного водіння (курсказівник) надає цінні дані про поля та роботи, що дозволяє аналізувати та оптимізувати процеси ведення сільськогосподарського господарства. Агрономи та фермери можуть отримати інформацію про якість ґрунту, погодні умови та врожайність, щоб приймати обґрунтовані рішення та покращувати планування сільськогосподарських робіт. Це сприяє підвищенню якості врожаю, збільшенню врожайності та оптимізації використання ресурсів.

Курсказівник розташовується усередині кабіни, у полі периферійного зору водія, звичайно над кермом або перед важелями керування. Водієві не потрібно перемикати увагу на відстеження зовнішніх орієнтирів, тому він менше відволікається від безпосереднього водіння й контролю над приладами.

Розглянемо принцип роботи системи паралельного руху (рисунок 2.3) [32].

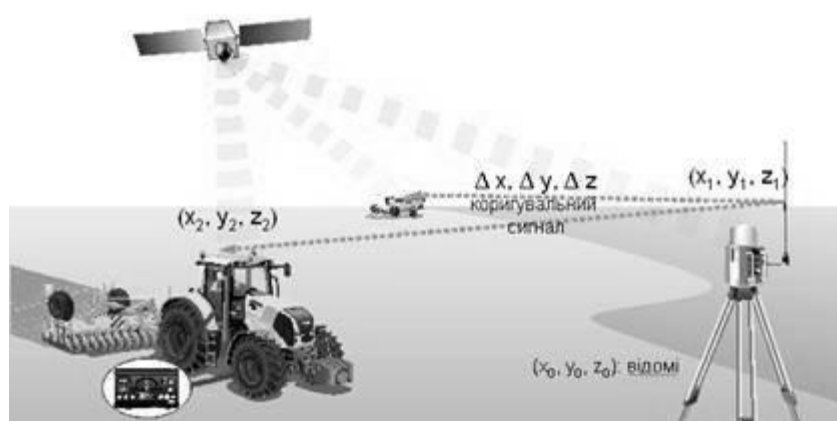


Рисунок 2.3 – Принцип роботи системи

Найпростіший прилад складається з терміналу-супутникового приймача, що встановлюється в кабіні трактора на лобовому склі (чи в будь-якому іншому зручному місці) та показує трактористу, як крутити кермо щоб трактор/агрегат рухався якомога рівнішими лініями.

Такий прилад не має складного для читання дисплею, адже водіння

відбувається в ручному режимі і трактористу бажано приділяти йому якомога менше уваги, в ідеалі прилад повинен знаходитись на боковому склі, а команди на керування тракторист сприймає боковим зором (після нетривалого тренування).

Щоб тракторист їхав не «на глазок» на полі розставляють так звані маяки (працівники, які відміряють лінії, які дорівнюють ширині агрегату) на які, в свою чергу, орієнтується механізатор.

На практиці все складніше і після обробітку агроном стикається з такими проблемами, як пропуски та перекриття.

Перед початком роботи водій вибирає необхідний режим обходу поля (маршрут руху), встановлює відстань між рядами й чутливість курсовказівника.

Система водіння, об'єднана з агрегатами точного дозування й спеціальним програмним забезпеченням, дозволяє створювати й згодом використовувати карти обробки полів із запам'ятовуванням траєкторії водіння машини. Сучасні системи з GPS - навігацією дозволяють прокладати й відслідковувати як прямолінійні, так і криволінійні траєкторії, і їх комбінації (рисунок 2.4) [33].

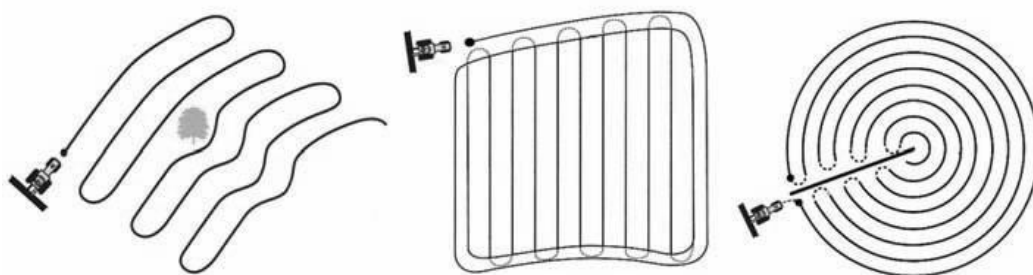


Рисунок 2.4 – Траєкторії руху

Поточне положення машини в кожний момент часу визначається за допомогою GPS - приймача, а запам'ятовування маршруту, обчислення відхилення від нього й керування індикацією здійснює спеціалізований процесор.

Алгоритм керування транспортним засобом за допомогою курсовказівника дуже простий: якщо індикатори світяться в центрі – машина йде правильно, якщо світло почало переміщатися, наприклад, вправо, та машина йде вправо – водій повинен компенсувати відхилення від ряду. Якщо водій виїхав з поля для

дозаправлення або був змушений припинити роботу через непогоду, то згодом він може повернутися в місце, де була зупинена робота, і продовжити водіння по обраній раніше траєкторії. Крім варіанта з «світлодіодними індикаторами в пластиковому корпусі» існують системи паралельного водіння із графічним дисплеєм, що формують двовимірне умовне зображення машини, оброблюваного ряду й ліній сітки для візуалізації руху.

Водій спочатку прокладає перший ряд, відзначаючи початкову (А) і кінцеву (В) крапки, як це показано на рисунку 2.5 [33]. На їхній основі процесор формує базову лінію АВ, а потім, при заданій ширині ряду, обчислює координати наступних рядів. Водій по курсовказівнику виконує прогони, розвороти й переходи на наступні ряди.

Основна перевага використання систем паралельного водіння – зменшення помилок при обробці полів.

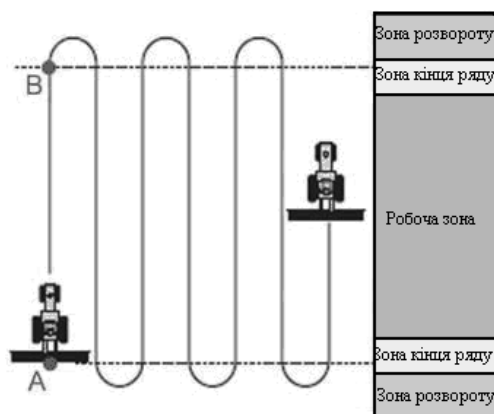


Рисунок 2.5 – Рух транспортного засобу

## 2.2 Автопілоти [34]

Другий варіант систем керування — автопілот. Автопілоти – це система автоматичного керування сільськогосподарськими машинами, яка дозволяє підтримувати польові роботи з максимальною точністю та мінімальним втручанням оператора.

Автопілот складається з електрогідравлічної системи автоматичного

керування трактором, що забезпечує автопілотування агрегату на полі. Водій допомагає процесу керування трактором тільки на поворотах, що дозволяє йому зосередити увагу на технологічному процесі й фізично менше утомлюватися.

Автопілотування відрізняється від паралельного водіння тим, що відхилення від заданої траєкторії, вироблювані GPS - приймачем, через спеціальні обладнання вводяться безпосередньо в систему керування ходовою частиною, забезпечуючи рух по маршруту без втручання механізатора. Як правило, автопілот складається з обладнання паралельного водіння, контролера й виконавчого механізму, який підключається до гідравліки трактора.

Цей механізм на базі електродвигуна управляється від системи паралельного водіння й передає зусилля через гумовий валик на кермове колесо, що дозволяє втримувати сільгоспмашину на заданому маршруті. Водій при цьому в будь-який момент може взяти керування на себе.

Зростаюча популярність автопілоту легко з'ясована: він автоматизує процес керування трактором, роль водія зводиться до установки на комп'ютері ширини захоплення, а також до візуального контролю руху по ряду й перехопленню керування в зоні розвороту а також, можливість працювати вночі (друга зміна) дозволить ефективніше використовувати дорогу техніку, прискорити процес амортизації та вчасно провести посів.

### 2.3 Види автопілотів

Системи автопілотування поділяються на гідравлічні [35], електричні [36] та підрулюючі.

Гідравлічні автопілоти вбудовуються в систему гідравліки трактора, безпосередньо управляючи колесами завдяки інформації з GPS приймача.

Гідравлічний автопілот складається з трьох компонентів:

- приймач GPS з обладнанням відображення (дисплеєм);
- електричний керуючий навігаційний контролер (NAV Контролер);
- гідравлічний керуючий блок.

На основі даних з приймача GPS гідравлічна система автопілоту повертає колеса в потрібну сторону для забезпечення прямолінійності руху, що дозволяє повністю реалізувати точність диференціальних виправлень. Автопілот веде техніку по декільком програмам: паралельними прямими лініями, паралельними кривими лініями, по колу, по азимуту та інше, і самостійно коректує рух на прямих і звивистих ділянках. При цьому оператор може в будь-який час перехопити керування в автопілота простим поворотом керма або натисканням на кнопку включення автопілоту.

Навіть при наявності дуже точного курсовказівника механізатор не в змозі 100% часу вести трактор по його вказівках. Спроби виправити власні помилки приводять до ще більших погрешностей в обробці землі. Автопілот позбавлений цих недоліків, що особливо яскраво проявляється при використанні його разом з високоточною системою паралельного водіння, здатної забезпечувати погрешність суміжних проходів у межах 10 см. Таку точність можна одержати тільки з використанням сервісів диференціальної корекції або базової станції RTK.

Система автопілотування Trimble AgGPS Autopilot представлена на рисунку 2.6 [36].

Trimble AgGPS автоматизована система рульового керування Autopilot автоматично керуватиме вашим транспортним засобом із повторюваністю в один дюйм від заводу до збору врожаю в будь-якій польовій схемі.

Система автопілота Trimble подовжує ваш робочий час, щоб ви могли працювати, коли вам потрібно, максимізувати точність ваших рядів і навіть зменшити витрати на паливо та витрати.

У будь-яких умовах: уночі, у туман, у пил, проти сонця - автопілот Trimble проведе трактор ідеальним курсом, зменшивши перекриття при посіві до 5-10 см і не залишаючи огріхів. Максимум продуктивності й економії пального, насіння і хімічних речовин.



Рисунок 2.6 - Система автопілотування Trimble AgGPS Autopilot

Електричні автопілоти з'єднуються із системами самого трактора через CAN-шину, і через неї передають керуючі сигнали на агрегати. Тому для використання цього типу автопілотів трактор повинен бути обладнаний такими агрегатами, як CAN-шиною й відповідним програмним забезпеченням.

При керуванні автопілотом маршрут руху трактора виходить близьким до ідеалу. У такому режимі має сенс придбати точний сигнал диференційного виправлення, для забезпечення автопілота максимальними можливостями.

## 3 КОЛІСНА МАШИНА ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ

### 3.1 Рівняння динаміки колісної машини

Для одержання рівняння руху колісної машини як об'єкта керування розглянемо схему руху колісної машини на повороті з урахуванням бічного відведення її коліс. При повороті машини на її колеса діють бічні реакції. При цьому колеса котяться під деяким кутом до своєї площини обертання. Внаслідок наявності бічного відведення передніх коліс машини  $\delta'_1$  й  $\delta''_1$  швидкість  $v_B$  точки В (середина передньої осі) спрямована під деяким кутом  $\delta_1$  до середньої площини обертання передніх коліс, повернених на кут  $\varphi$ , стосовно поздовжньої осі машини АВ. Аналогічно, швидкість  $v_A$  точки А (середина задньої осі) внаслідок бічного відведення задніх коліс  $\delta'_2$  і  $\delta''_2$  буде спрямована під деяким кутом  $\delta_2$  стосовно поздовжньої осі машини АВ. При відсутності бічного відведення кожне колесо котилося б у площині свого обертання й миттєвий центр обертання всієї машини розташовувався б у деякій крапці О'. Однак через наявність бічного відведення коліс миттєвий центр обертання машини розташовувався в деякій крапці О, положення якої залежить від кута повороту керованих коліс  $\varphi$ , бічної еластичності передніх і задніх коліс, швидкості руху машини й радіуса її повороту.

Таким чином, схему сил і моментів можна представити схемою, показаною на рисунку 3.1 [37].

$N$  - сила інерції нормальна й  $T$  - сила інерції тангенціальна дорівнюють добуткам маси колісної машини на  $j_{cp}$  - прискорення центру тяжіння нормальне й  $j_{ct}$  - прискорення центру тяжіння тангенціальне відповідно.

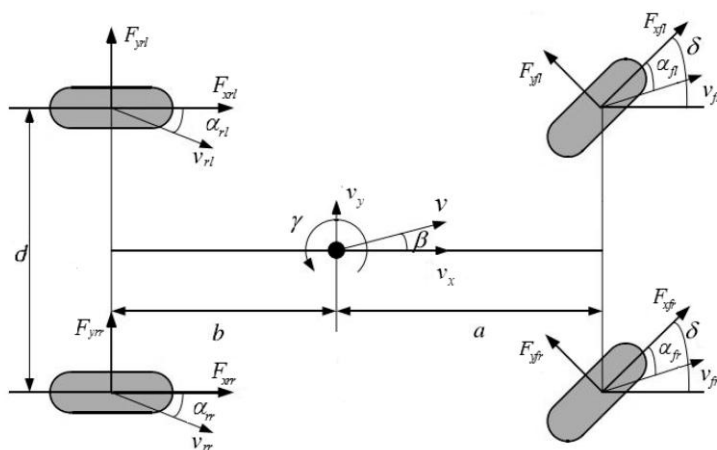


Рисунок 3.1 - Спрощена схема сил і моментів

Для визначення цих прискорень розглянемо рух машини (точніше, її поздовжньої осі АВ) щодо нерухливої системи координат X і Y, як показано на рисунку 3.2.

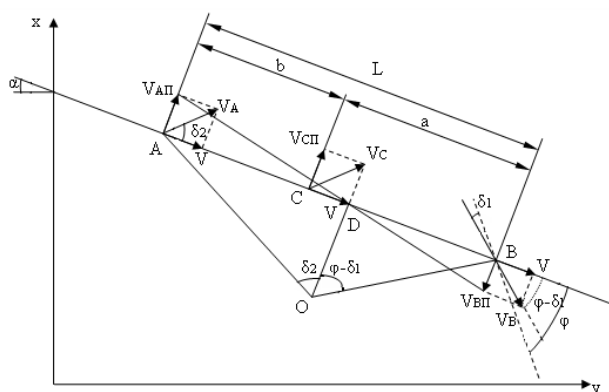


Рисунок 3.2 - План швидкостей колісної машини

Наслідком рисунка 3.2 є:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt}; \quad (3.1)$$

$$j_\omega = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}. \quad (3.2)$$

де  $j_{\omega}$  - кутове прискорення;

$\omega$  - кутова швидкість обертання машини;

$\alpha$  - кут між осями АВ і У;

$e \frac{d\omega}{dt}$  - кутове прискорення машини.

Проекції повної швидкості  $v_c$  центру тяжіння машини С на осі Х і У визначаються з рисунка 3.2. Розкладемо швидкість  $v_c$  на швидкості  $v$  і  $v_{cn}$ . Приймаючи їх напрямом від початку координат позитивними, одержимо:

$$v_x = v_{cn} \cos \alpha - v \sin \alpha ; \quad (3.3)$$

$$v_y = v \cos \alpha + v_{cn} \sin \alpha . \quad (3.4)$$

Диференціюючи ці рівняння, одержимо вираження для проекцій прискорення центру тяжіння машини:

$$j_{cx} = \frac{dv_x}{dt} = \frac{dv_{cn}}{dt} \cos \alpha - v_{cn} \omega \sin \alpha - \frac{dv}{dt} \sin \alpha - v \omega \cos \alpha ; \quad (3.5)$$

$$j_{cy} = \frac{dv_y}{dt} = \frac{dv}{dt} \cos \alpha - v \omega \sin \alpha + \frac{dv_{cn}}{dt} \sin \alpha + v_{cn} \omega \cos \alpha . \quad (3.6)$$

Прискорення  $j_{cx}$  і  $j_{cy}$  центру тяжіння колісної машини, спрямовані уздовж координатних осей Х, У, можуть бути визначені безпосередньо як проекції прискорень  $j_{cn}$  і  $j_{ct}$ .

Якщо швидкість  $v_c$  зменшується, тоді

$$j_{cy} = -j_{ct} \cos \alpha - j_{cn} \sin \alpha ; \quad (3.7)$$

$$j_{cx} = -j_{cn} \cos \alpha - j_{ct} \sin \alpha . \quad (3.8)$$

Вирішуючи спільно рівняння (3.6), (3.7) і (3.8), одержимо остаточні вираження для прискорень центру тяжіння машини:

$$j_{cn} = \omega v - \frac{dv_{cn}}{dt}; \quad (3.9)$$

$$j_{ct} = \frac{dv}{dt} + \omega v_{cn}. \quad (3.10)$$

Знаючи  $j_{cn}$  і  $j_{ct}$ , можна визначити сили інерції  $N$  і  $T$ , які необхідно прикласти до центру тяжіння машини для того, щоб розглядати її, наче вона перебуває в рівновазі:

$$N = m \left( \omega v - \frac{dv_{cn}}{dt} \right); \quad (3.11)$$

$$T = m \left( \frac{dv}{dt} + \omega v_{cn} \right). \quad (3.12)$$

де  $m$  — маса машини.

Вираження може бути визначене залежно від характеру руху машини й бічної еластичності її коліс.

Кути бічного відведення коліс  $\delta_1$  і  $\delta_2$  можна прийняти пропорційними бічним реакціям, діючим на ці колеса. Те ж відноситься й до осі, якщо радіус повороту машини  $R$  досить великий і якщо жодне з коліс цієї осі не одержало бічного ковзання. У результаті кути  $\delta_1$  і  $\delta_2$  бічного відведення передньої й задньої осі машини можуть бути виражені через сумарні бічні реакції  $Y_1$  і  $Y_2$ :

$$\begin{cases} Y_1 = K_{\delta_1} \cdot \delta_1; \\ Y_2 = K_{\delta_2} \cdot \delta_2; \\ K_{\delta_1} = \frac{1}{z_1}; \\ K_{\delta_2} = \frac{1}{z_2}, \end{cases} \quad (3.13)$$

де  $z_1, z_2$ — коефіцієнти бічного відведення передньої й задньої осей машини.

$z_1, z_2$  чисельно рівні куту бічного відведення в радіанах, при дії на вісь бічної реакції 1 кг.

Крім цього, кути  $\delta_1$  і  $\delta_2$  можуть бути визначені за допомогою схеми, зображеної на рисунку 3.2. Користуючись цією схемою, одержимо:

$$\frac{v_{An}}{v_A} = \frac{AD}{AO}; \quad (3.14)$$

$$\frac{v_{Bn}}{v_B} = \frac{AD}{BO}; \quad (3.15)$$

або

$$v_{An} = \frac{v_A}{AO} AD = wb + v_{cn}; \quad (3.16)$$

$$v_{Bn} = \frac{v_B}{BO} BD = wa - v_{cn}. \quad (3.17)$$

Із цієї ж схеми

$$v_{An} = v \cdot \operatorname{tg} \delta_2; \quad (3.18)$$

$$v_{Bn} = v \cdot \operatorname{tg}(\varphi - \delta). \quad (3.19)$$

Тоді

$$\operatorname{tg}\delta_2 = \frac{wb + v_{cn}}{v}; \quad (3.20)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi - \delta_1) = \frac{wa - v_{cn}}{v}. \quad (3.21)$$

Кути  $\delta_1$  і  $\delta_2$  бічного відведення передньої й задньої осей машини звичайно невеликі.

Якщо прийняти також невеликим і кут повороту керованих коліс  $\varphi$ , то одержимо:

$$\operatorname{tg}\delta_2 \approx \delta_2; \quad (3.22)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi - \delta_1) \approx \varphi - \delta_1. \quad (3.23)$$

Тоді

$$\begin{cases} Y_1 = K_{\delta_1} \frac{v_{cn} - w \cdot a + v\varphi}{v}; \\ Y_2 = K_{\delta_2} \frac{v_{cn} + w \cdot b}{v}. \end{cases} \quad (3.24)$$

Одночасно із цим з умови рівноваги системи (рисунок 3.1) вважаємо, що  $\varphi$  досить малий, тоді

$$\cos \varphi \approx 1; \quad (3.25)$$

$$Y_1 + Y_2 = m \left( w \cdot v - \frac{dv_{cn}}{dt} \right). \quad (3.26)$$

Вирішуючи спільно рівняння (3.24) і (3.26), одержимо

$$\frac{dv_{cn}}{dt} + \frac{K_{\delta_1} + K_{\delta_2}}{mv} v_{cn} = vw + \frac{aK_{\delta_1} - bK_{\delta_2}}{mv} w - \frac{K_{\delta_1} \varphi}{m}. \quad (3.27)$$

Рух колісної машини з урахуванням еластичності шин описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} v_x = v_{cn} \cos \alpha - v \sin \alpha; \\ v_y = v \cos \alpha + v_{cn} \sin \alpha; \\ \frac{d\alpha}{dt} = w; \end{cases} \quad (3.28)$$

$$\frac{dv_{cn}}{dt} + \left( \frac{K_{\delta_1} + K_{\delta_2}}{mv} \right) v_{cn} = v \cdot w + \left( \frac{aK_{\delta_1} - bK_{\delta_2}}{mv} \right) w - \frac{K_{\delta_1} \varphi}{m}; \quad (3.29)$$

$$J \frac{dw}{dt} + \left( \frac{a^2 K_{\delta_1} + b^2 K_{\delta_2}}{v} \right) w = \frac{v_{cn}}{v} (aK_{\delta_1} - bK_{\delta_2}) + aK_{\delta_1} \varphi, \quad (3.30)$$

де  $j$  - момент інерції машини щодо вертикальної осі, що проходить через центр тяжіння.

Введемо наступні позначення для постійних коефіцієнтів:

$$\frac{a^2 K_{\delta_1} + b^2 K_{\delta_2}}{jv} = A; \quad (3.31)$$

$$\frac{aK_{\delta_1} - bK_{\delta_2}}{jv} = B; \quad (3.32)$$

$$v + \frac{aK_{\delta_1} - bK_{\delta_2}}{mv} = C; \quad (3.33)$$

$$\frac{K_{\delta_1} + K_{\delta_2}}{mv} = D; \quad (3.34)$$

$$\frac{aK_{\delta_1}}{j} = \mu; \quad (3.35)$$

$$\frac{K_{\delta_1}}{m} = n. \quad (3.36)$$

Після заміни в цих рівняннях буквених виражень на відповідні коефіцієнти одержимо:

$$\frac{dv_{cn}}{dt} - Cw + Dv_{cn} + n\varphi = 0; \quad (3.37)$$

$$\frac{dw}{dt} + Aw - Bv_{cn} - \mu\varphi = 0. \quad (3.38)$$

З рівняння (3.38) знаходимо

$$v_{cn} = \frac{1}{B} \frac{dw}{dt} + \frac{A}{B} w - \frac{\mu}{B} \varphi. \quad (3.39)$$

Продиференціюємо рівняння (3.38) по t:

$$\frac{d^2w}{dt^2} + A \frac{dw}{dt} - B \frac{dv_{cn}}{dt} - \mu \frac{d\varphi}{dt} = 0. \quad (3.40)$$

З рівняння (3.37) підставляємо  $\frac{dv_{cn}}{dt}$  в рівняння (3.40), після згрупування членів це рівняння запишемо у вигляді:

$$\frac{d^2w}{dt^2} + (A + D) \frac{dw}{dt} + (AD - BC)w = (\mu D - nB)\varphi + \mu \frac{d\varphi}{dt}. \quad (3.41)$$

Таким чином, система двох рівнянь (3.37) і (3.38) приведена до одного диференційного рівняння другого порядку. Так як

$$\begin{cases} w = \frac{d\alpha}{dt}; \\ \frac{dw}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2}; \\ \frac{d^2w}{dt^2} = \frac{d^3\alpha}{dt^3}, \end{cases} \quad (3.42)$$

тоді, упровадивши позначення:

$$\begin{cases} A + D = b_1; \\ \mu D - nB = a_1; \\ AD - BC = b_2; \\ \mu = a_2. \end{cases} \quad (3.43)$$

З рівняння (3.40), (3.41) запишемо рівняння в операторній формі:

$$s^3 a + b_1 s^2 \alpha + b_2 s \alpha = a_1 \varphi + a_2 s \varphi, \quad (3.44)$$

де  $s$  – оператор Лапласа:

$$s = \frac{d}{dt}. \quad (3.45)$$

Звідси

$$\alpha s(s^2 + b_1 s + b_2) \alpha = \varphi(a_2 s + a_1). \quad (3.46)$$

Після цього знаходимо передатну функцію

$$W_\alpha(s) = \frac{\alpha}{\varphi} = \frac{a_2 s + a_1}{s(s^2 + b_1 s + b_2)} = \frac{K_0(T_3 s + 1)}{s(T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)}, \quad (3.47)$$

де

$$\begin{cases} \frac{a_1}{b_2} = K_0; \\ \frac{a_2}{a_1} = T_3; \\ \frac{1}{b_2} = T_2^2; \\ \frac{b_1}{b_2} = T_1. \end{cases} \quad (3.48)$$

Підставляючи значення з (3.43), одержимо:

$$T_3 = \frac{a_2}{a_1} = \frac{\mu}{\mu D - n B}, \quad (3.49)$$

де

$$\mu D - nB = \frac{K_{\delta_1} \cdot K_{\delta_2} (a + b)}{mvj}. \quad (3.50)$$

Тому

$$T_3 = \frac{aK_{\delta_1} \cdot mvj}{jK_{\delta_1} \cdot K_{\delta_2} (a + b)} = \frac{amv}{K_{\delta_2} (a + b)}. \quad (3.51)$$

Аналогічно:

$$T_2^2 = \frac{1}{b_2} = \frac{1}{AD - BC} = \frac{jmv^2}{K_{\delta_1} \cdot K_{\delta_2} (a + b)^2 - mv(aK_{\delta_1} - bK_{\delta_2})}; \quad (3.52)$$

$$T_1 = \frac{b_1}{b_2} = \frac{A + D}{AD - BC} = \frac{[m(a^2K_{\delta_1} + b^2K_{\delta_2}) + j(K_{\delta_1} + K_{\delta_2})] \cdot v}{K_{\delta_1} \cdot K_{\delta_2} (a + b)^2 - mv^2(aK_{\delta_1} - bK_{\delta_2})}. \quad (3.53)$$

Визначимо

$$K_0 = \frac{a_1}{b_2} = \frac{\mu D - nB}{AD - BC} = \frac{K_{\delta_1} \cdot K_{\delta_2} (a + b) \cdot v}{K_{\delta_1} \cdot K_{\delta_2} (a + b)^2 - mv^2(aK_{\delta_1} - bK_{\delta_2})}. \quad (3.54)$$

Наведені рівняння повністю визначають передатну функцію  $W_\alpha(s)$ , дозволяють знайти залежність коефіцієнта  $K_0$  й постійних часу  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  від постійних коефіцієнтів диференціального рівняння руху автомобіля.

Для знаходження передатної функції  $W_x(s) = \frac{x}{\varphi}$ , що виражає відношення лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії до кута повороту  $\varphi$  передніх коліс, зручно користатися рисунком 3.3.

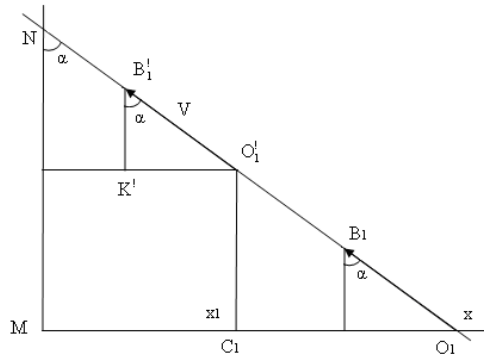


Рисунок 3.3 - Кінематика наближення колісної машини до заданої траєкторії

З рисунка 3.3 маємо

$$C_1O_1 = x_1 - x = \Delta x_1; \quad (3.55)$$

$$\Delta x = O_1O_1' \cdot \sin \alpha = v \cdot \Delta t \cdot \sin \alpha; \quad (3.56)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v \cdot \sin \alpha. \quad (3.57)$$

Переходячи до межі, маємо:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = v \cdot \sin \alpha. \quad (3.58)$$

або з урахуванням малості  $\alpha$  ( $\sin \alpha \approx \alpha$ ), маємо

$$\frac{dx}{dt} = v \cdot \alpha. \quad (3.59)$$

Звідси

$$\alpha = \frac{1}{v} \cdot \frac{dx}{dt}. \quad (3.60)$$

Диференціюючи по  $t$  рівняння (3.60), маємо

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{v} \cdot \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (3.61)$$

Вирішуючи спільно рівняння (3.41) і (3.42), одержимо

$$\begin{cases} w = \frac{1}{v} \cdot \frac{d^2x}{dt^2}; \\ \frac{dw}{dt} = \frac{1}{v} \cdot \frac{d^3x}{dt^3}; \\ \frac{d^2w}{dt^2} = \frac{1}{v} \cdot \frac{d^4x}{dt^4}. \end{cases} \quad (3.62)$$

Підставляючи значення в рівняння (3.44), одержимо

$$\frac{1}{v}(s^4x + b_1s^3x + b_2s^2x) = (a_2s + a_1)\varphi. \quad (3.63)$$

Звідси

$$s^2(s^2 + b_1s + b_2)x = v(a_2s + a_1)\varphi; \quad (3.64)$$

або

$$W_\alpha(s) = \frac{x}{\varphi} = \frac{v(a_2s + a_1)}{s^2(s^2 + b_1s + b_2)} = \frac{K(T_3s + 1)}{s^2(T_2^2s^2 + T_1s + 1)}, \quad (3.65)$$

де  $T_1, T_2, T_3$  - такі, як і у рівнянні (3.47).

$$K = \frac{a_1 v}{b_2} = K_0 v. \quad (3.66)$$

З рівняння (3.66) знаходимо коефіцієнт  $K$ :

$$K = \left[ \frac{K_{\delta_1} \cdot K_{\delta_2} (a + b) \cdot v}{K_{\delta_1} \cdot K_{\delta_2} (a + b)^2 - m v^2 (a K_{\delta_1} - b K_{\delta_2})} \right] \cdot v. \quad (3.67)$$

Таким чином, остаточно одержуємо передатні функції:

$$W_\alpha(s) = \frac{K_0 (T_3 s + 1)}{s (T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)}; \quad (3.68)$$

$$W_x(s) = \frac{K (T_3 s + 1)}{s^2 (T_2^2 s^2 + T_1 s + 1)}. \quad (3.69)$$

## 3.2 Моделювання в MATLAB

При складанні структурної схеми системи керування будемо орієнтуватися на необхідний закон керування, припускаючи, що всі елементи системи не мають динамічних погрешностей. Структурна схема є графічним відображенням закону керування. Перевага структурної схеми перед рівнянням закону керування полягає в тому, що в структурній схемі можна побачити взаємодії динамічних елементів. Ця обставина наочна показує шляхи синтезу систем з елементами із заданими динамічними характеристиками.

Нашу колісну машину можна представити структурною схемою, представленою на рисунку 3.4. Коли складена структурна схема з ідеальних елементів, легко перейти до схеми з реальних елементів. Така схема необхідна при дослідженні процесів у системі керування, особливо при визначенні критичних значень параметрів системи.

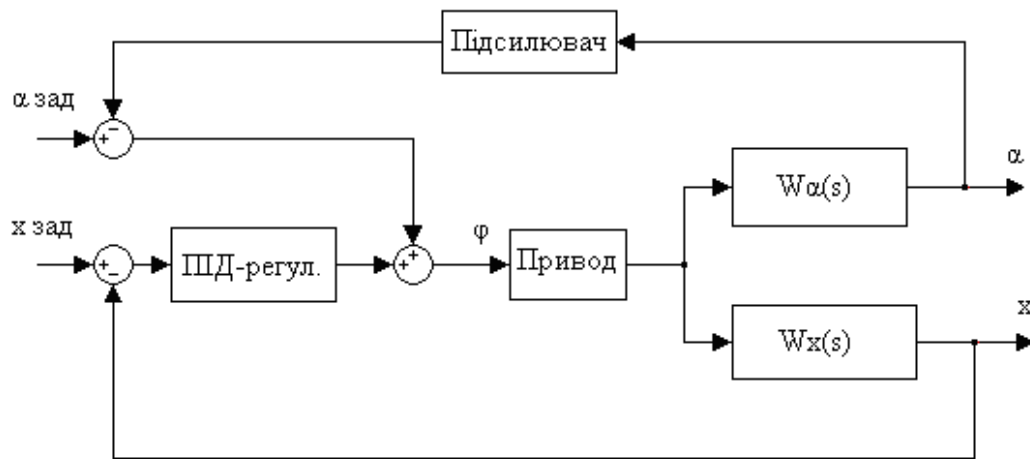


Рисунок 3.4 – Структурна схема руху колісної машини

Для моделювання кута повороту  $\varphi$  передніх коліс (рисунок 3.5) і лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$  (рисунок 3.6) скористаємося функціональними схемами системи, створеними за допомогою Simulink.

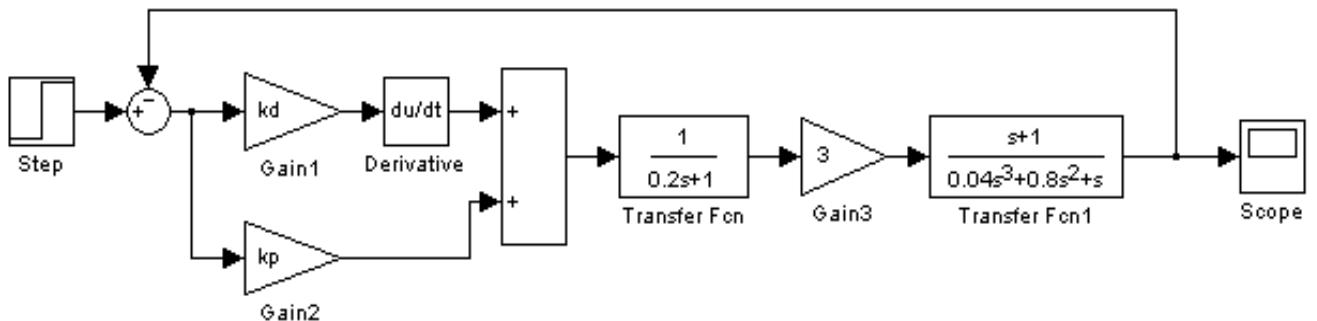


Рисунок 3.5 – Машинна схема моделювання кута повороту  $\varphi$  передніх коліс

Значення передаточних чисел у законі керування будемо визначати за допомогою пакета MATLAB–Simulink.

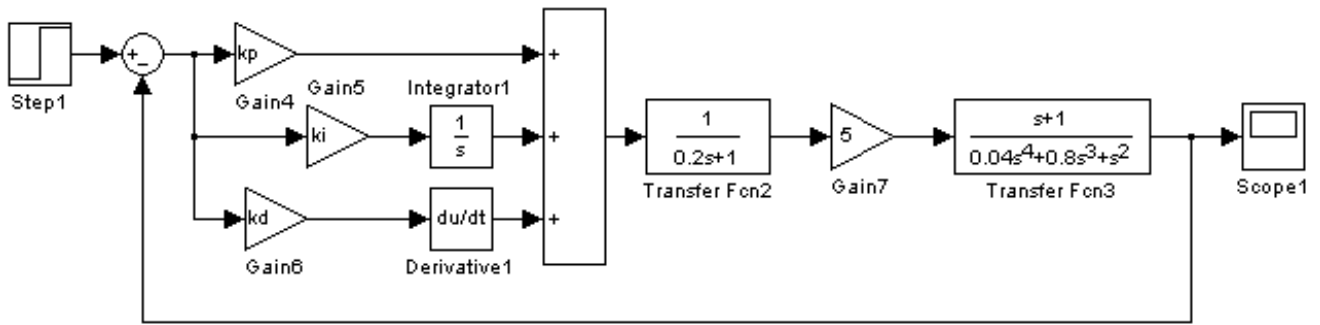


Рисунок 3.6 – Машинна схема моделювання лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії

На підставі структурної схеми, представленої на рисунку 3.4, була розроблена машинна схема моделювання, наведена на рисунку 3.7, за допомогою якої досліджуємо поведінку системи.

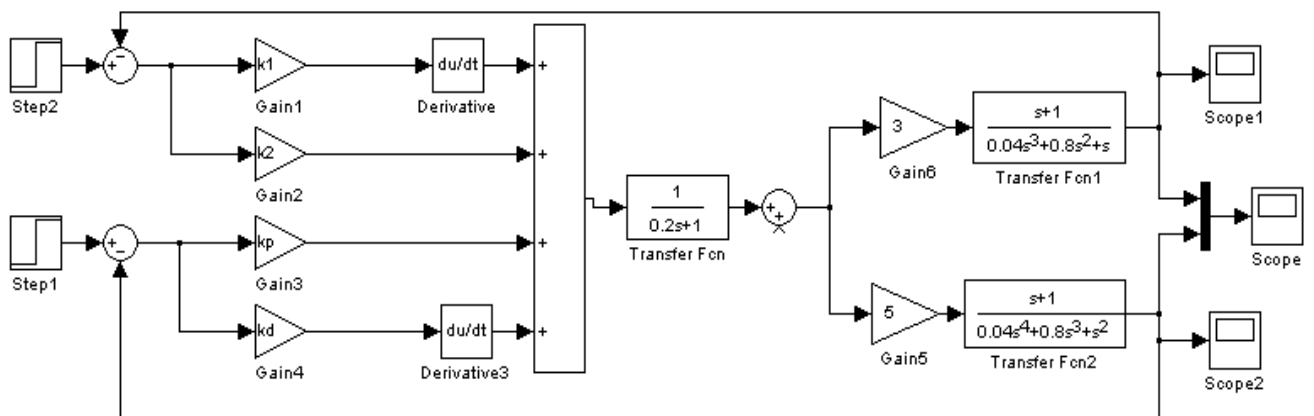


Рисунок 3.7 – Машинна схема моделювання системи керування

У результаті проведених досліджень були отримані графіки перехідних процесів для кута повороту  $\varphi$  передніх коліс і лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$ , наведені на рисунках 3.8 – 3.17.

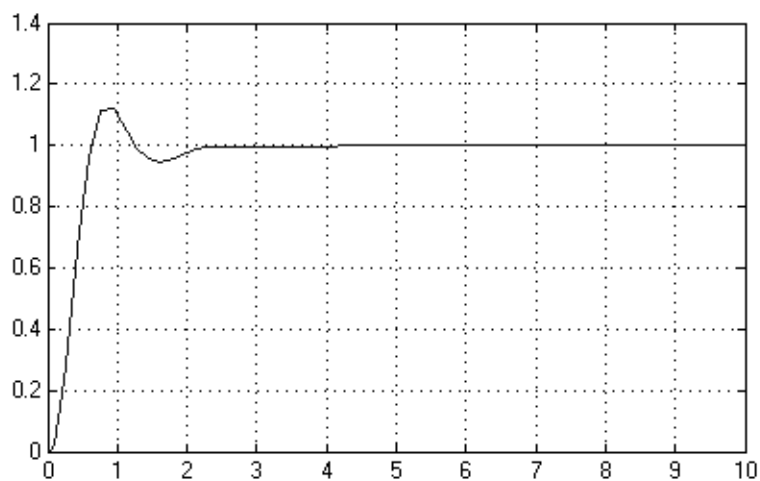


Рисунок 3.8 – Графік перехідного процесу для кута повороту  $\varphi$  передніх коліс при коефіцієнтах  $k_d=0$  і  $k_r=1$

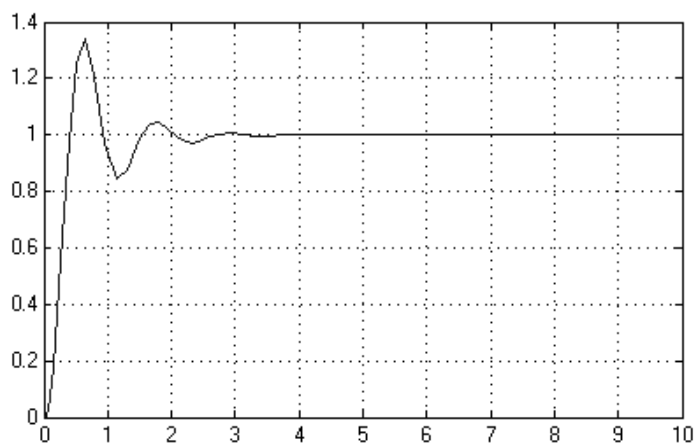


Рисунок 3.9 – Графік перехідного процесу для кута повороту  $\varphi$  передніх коліс при коефіцієнтах  $k_d=0$  і  $k_r=1.8$

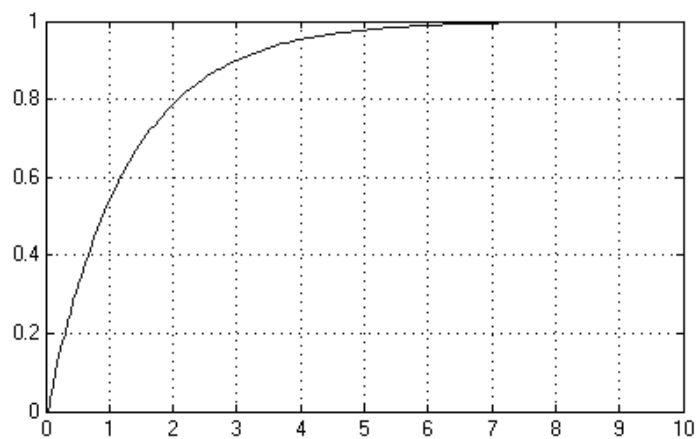


Рисунок 3.10 – Графік перехідного процесу для кута повороту  $\varphi$  передніх коліс при коефіцієнтах  $k_d=2$  і  $k_r=1.8$

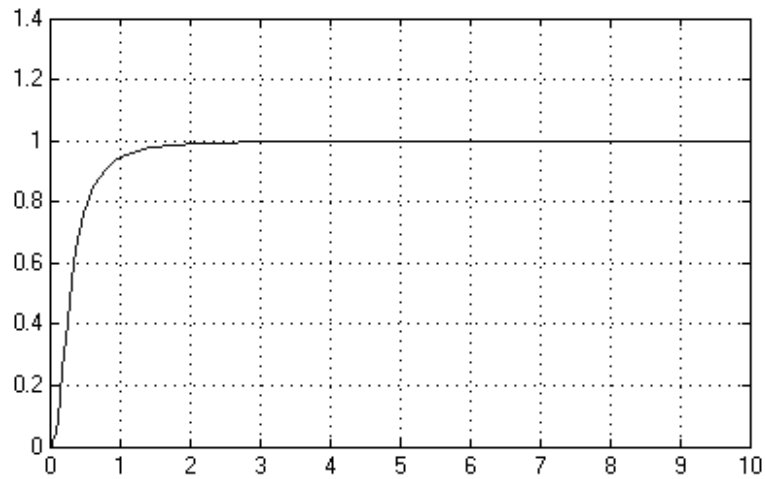


Рисунок 3.11 – Графік перехідного процесу для кута повороту  $\varphi$  передніх коліс при коефіцієнтах  $k_d=0.4$  і  $k_p=1.8$

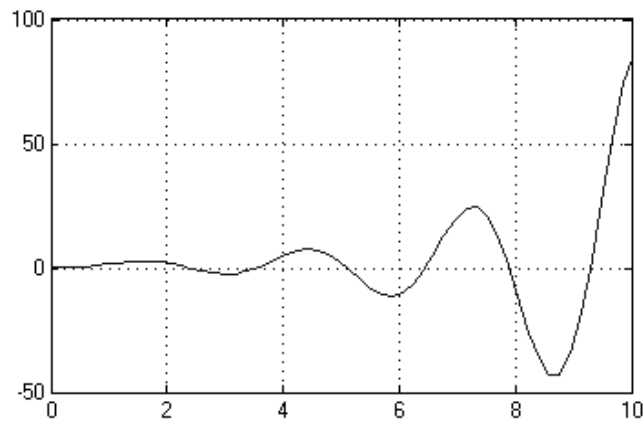


Рисунок 3.12 – Графік перехідного процесу для лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$  при  $k_p=1$ ,  $k_d=0$ ,  $k_i=0$

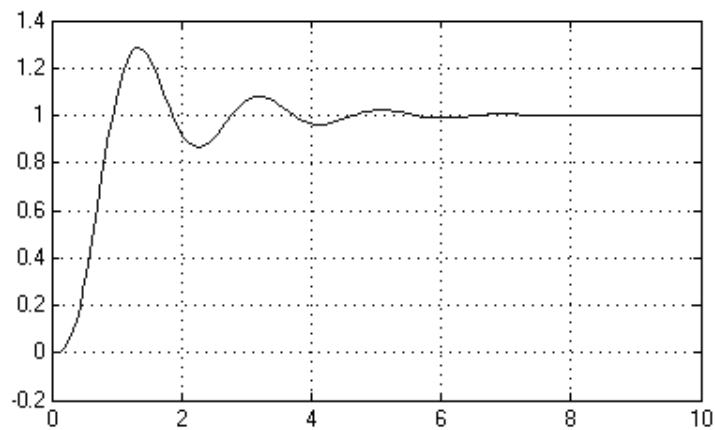


Рисунок 3.13 – Графік перехідного процесу для лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$  при  $k_p=1$ ,  $k_d=0.5$ ,  $k_i=0$

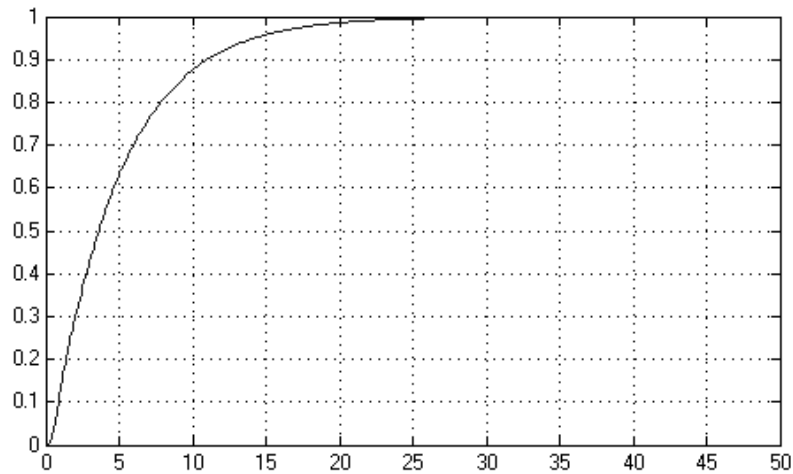


Рисунок 3.14 – Графік перехідного процесу для лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$  при  $k_p=0.1$ ,  $k_d=0.5$ ,  $k_i=0$

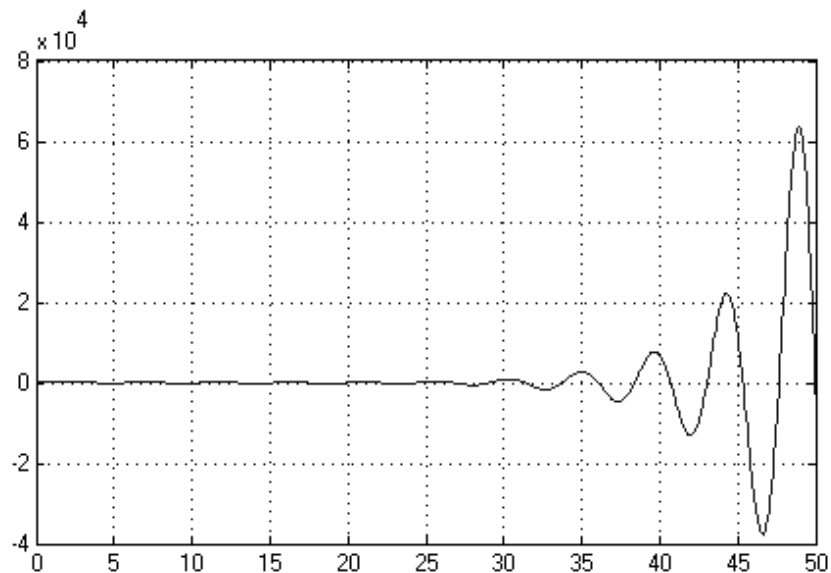


Рисунок 3.15 – Графік перехідного процесу для лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$  при  $k_p=0.1$ ,  $k_d=0.5$ ,  $k_i=1$

Введення інтегральної складової в контурі керування лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії привело до нестійкого режиму роботи системи, тому в подальших дослідженнях ми маємо нею нехтувати.

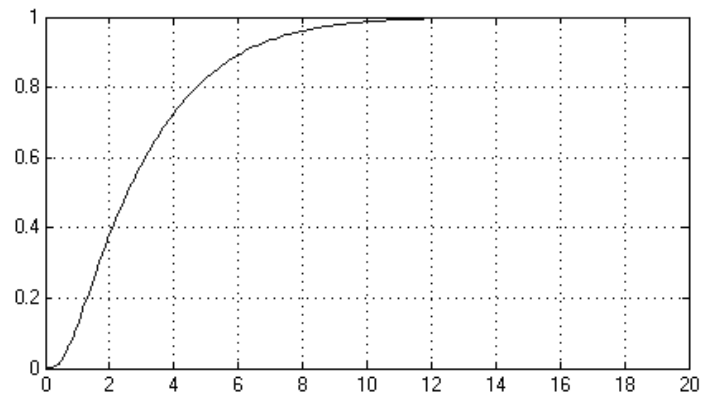


Рисунок 3.16 – Графік перехідного процесу для лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$  при  $k_p=0.08$ ,  $k_d=0.25$ ,  $k_i=0$

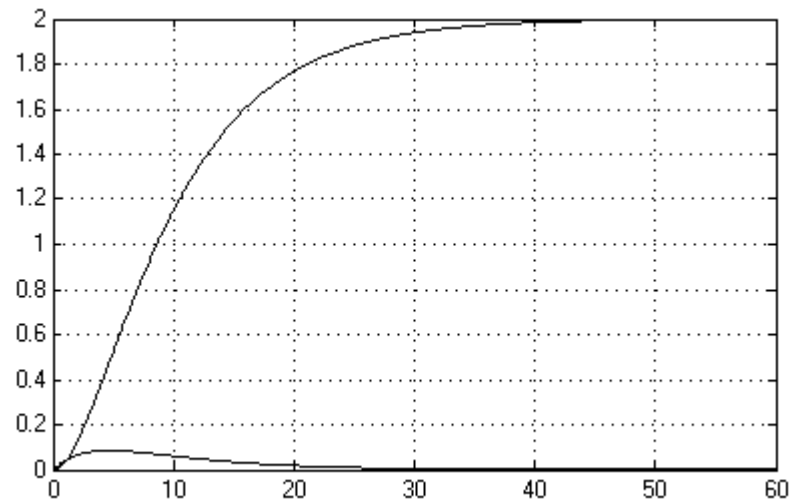


Рисунок 3.17 – Графік перехідного процесу системи керування при  $k_1=1.67$ ,  $k_2=0.05$ ,  $k_p=0.05$ ,  $k_d=0.5$

Таким чином, система моделювання кута повороту  $\varphi$  передніх коліс і лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії задовольняє вимогам, якщо в контурі управління кутом повороту  $\varphi$  використовується ПД-регулятор, а в контурі керування лінійним відхиленням об'єкта – ПІД-регулятор.

## ВИСНОВКИ

Очевидно, що рішення навігаційних задач не менш важливо для сучасних рухливих об'єктів і для людства, загалом, ніж питання створення нових конструкцій, двигунів та інше. Тому розвиток техніки постійно вимагає створення надійних навігаційних приладів, здатних працювати не тільки на поверхні Землі, але й у далекому космосі і у морській безодні.

Використання супутникових технологій у дорожньому будівництві дуже ефективно. Застосування систем точного водіння має наступні переваги:

- зниження долі інженерних робіт;
- збільшення ефективності й продуктивності виробництва грабарств за рахунок значного зниження кількості проходів при підготовці проектної поверхні;
- економія палива й моторесурсу техніки;
- застосування автопілоту автоматизує процес керування БДМ;
- зниження неточностей обробки поверхонь.

Застосування систем навігації широко використовується при роботі дорожньо-будівельних машин. Таким чином, складне відсіпання ґрунту, підготовка крутих укосів і водоймищ при дорожньому будівництві або виконання асфальтування з автоматичним контролем поперечного ухилу, рівності й товщини покриття - усі види робіт виконуються однаково швидко й просто.

У даній роботі були розглянуті основи глобальної системи позиціонування GPS, принципи роботи й функції системи GPS, порівняні її характеристики з характеристиками інших супутникових навігаційних систем, розглянуто застосування супутникової навігації при роботі дорожніх машин, приведені основні прилади, які застосовуються, описані інноваційні GPS технології в сільському господарстві, та проведено моделювання кута повороту  $\varphi$  передніх коліс і лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$ .

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. GNSS positioning in construction machinery // Trimble Technical White Paper. – Sunnyvale, USA: Trimble Inc., 2022. – 18 p.
2. Слюсар, В.І. Автоматизовані системи керування будівельною технікою на основі супутникової навігації // Науково-технічний журнал «Автоматизація та приладобудування». – 2021. – №3. – С. 45–52.
3. GPS (Global Positioning System) навігація. Що це таке і як працює? URL: <https://waymaps.ua/gps-global-positioning-system-navihatsiia-shcho-tse-take-i-iak-pratsiuie/> (дата звернення 10.09.2025).
4. Які переваги використання GPS-трекера для автомобіля? URL: <https://www.sinotrackgps.com/uk/blog/what-are-the-benefits-of-using-a-car-gps-tracker> (дата звернення 10.09.2025).
5. Системи моніторингу місцезнаходження, параметрів руху та пройденого шляху автомобіля. URL: [https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/158686/mod\\_resource/content/1/Лекція%20СИСТЕМИ%20GPS-МОНІТОРИНГУ%20ТЗ.pdf](https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/158686/mod_resource/content/1/Лекція%20СИСТЕМИ%20GPS-МОНІТОРИНГУ%20ТЗ.pdf) (дата звернення 10.09.2025).
6. Як це працює: GPS (Global Positioning System). URL: <https://www.fizyka.ua.com/post/yak-tse-pratsyuje-gps-global-positioning-system> (дата звернення 10.09.2025).
7. Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS). Елементи будови системи GPS та її функціонування. URL: <https://www.sinotrackgps.com/uk/blog/what-are-the-benefits-of-using-a-car-gps-tracker> (дата звернення 10.09.2025).
8. Які переваги використання GPS моніторингу? URL: <https://ukrastra.com.ua/uslugi/info/bezopasno/> (дата звернення 10.09.2025).
9. Глобальні навігаційні супутникові системи та їх роль у технологіях точного землеробства. URL: <http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/25561.pdf> (дата звернення 15.09.2025).
10. «Навстар» (NAVSTAR/ GPS). URL: <https://studfile.net/preview/10568824/p>

age:5/ (дата звернення 15.09.2025).

11. Beidou. URL: <https://waymaps.ua/beidou/> (дата звернення 15.09.2025).

12. Galileo HAS: високоточна навігація без базових станцій. URL: [https://gpsgeometer.com/blog/galileo-has-high-precision-navigation-no-need-base-stations?srsltid=AfmBOor-wiGZwoiGhzCfZcNX8UfTQmsLknimO\\_9v5i0yDaG3iaWvteMk](https://gpsgeometer.com/blog/galileo-has-high-precision-navigation-no-need-base-stations?srsltid=AfmBOor-wiGZwoiGhzCfZcNX8UfTQmsLknimO_9v5i0yDaG3iaWvteMk) (дата звернення 15.09.2025).

13. GPS приймачі. URL: <https://geomagazin.com.ua/ua/g8047799-gps-priyomniki?srsltid=AfmBOooAQGF1rchLDD6g2eeoeR-nkW5NeB56efv30V3BeP70X2RL2LAJ> (дата звернення 15.09.2025).

14. Глобальні навігаційні супутникові системи [Електронний ресурс]: конспект лекцій / Ю. В. Медведський. – Київ: КНУБА, 2025. – 112 с.

15. 2D система управління бульдозером. URL: [https://ngc.com.ua/ua/p/975-leica-icon\\_igd2.html](https://ngc.com.ua/ua/p/975-leica-icon_igd2.html) (дата звернення 15.09.2025).

16. 3D система управління бульдозером. URL: [https://ngc.com.ua/ua/p/976-leica-icon\\_igd3.html](https://ngc.com.ua/ua/p/976-leica-icon_igd3.html) (дата звернення 15.09.2025).

17. GNSS - приймач для управління будтехніки Leica iCON GPS 80. URL: [https://ngc.com.ua/ua/p/808-leica-icon\\_gps\\_80.html](https://ngc.com.ua/ua/p/808-leica-icon_gps_80.html) (дата звернення 15.09.2025).

18. Leica MSS1300 Single Slope Sensor. URL: <https://www.transitandlevel.com/shop/767439-leica-mss1300-single-slope-sensor-7049?srsltid=AfmBOopfGVSlgXLC3Y6StMZzxMTHnH8EVNiOnQMPmfcSzg3Dhw3Pvgf> (дата звернення 15.09.2025).

19. Leica MRS1300 Rotation Sensor, Universal. URL: <https://www.transitandlevel.com/shop/767435-leica-mrs1300-rotation-sensor-universal-7048#:~:text=The%20Leica%20MRS1300%20Rotation%20Sensor%2C%20Universal%20is,as%20in%20construction%20machinery%20or%20positioning%20systems.> (дата звернення 15.09.2025).

20. Датчики для системи управління екскаватором Leica MSS400. URL: <https://ngc.com.ua/ua/p/944-leica-mss400.html>. (дата звернення 15.09.2025).

21. Системи нівелювання Асфальтоукладач/Дорожня фреза URL:

[https://ngc.com.ua/ua/shop/sistemy-nivelirovaniya/f-52\\_215\\_asfaltoukladchik-dorozhnaya-freza/](https://ngc.com.ua/ua/shop/sistemy-nivelirovaniya/f-52_215_asfaltoukladchik-dorozhnaya-freza/). (дата звернення 15.09.2025).

22. Системи керування технікою Topcon для бульдозерів. URL: <https://ukrgeomc.com/catalog/dlya-buldozera?srsltid=AfmBOoqcoobd4a--m44eBVeeYOO6vaZm5lfIdbGMvofle7xzme7mWrTk>. (дата звернення 25.09.2025).

23. Системи керування технікою Topcon для автогрейдерів. URL: <https://ukrgeomc.com/catalog/dlya-avtogrejdera>. (дата звернення 25.09.2025).

24. Системи керування технікою Topcon для екскаваторів. URL: <https://ukrgeomc.com/catalog/dlya-ekskavatora>. (дата звернення 25.09.2025).

25. Excavator 3D. URL: Excavator 3D - Zaxco Enterprise. (дата звернення 25.09.2025).

26. Системи керування технікою Topcon для асфальтоукладачів. URL: <https://ukrgeomc.com/catalog/dlya-asfaltoukladacha>. (дата звернення 25.09.2025).

27. Навігація для сільгосптехніки: сучасні рішення для ефективного землеробства. URL: <https://rtk-navigation.com/background-information/navigatsiya-dlya-silgosptehniki-suchasni-rishennya-dlya-efektivnogo-zemlerobstva?srsltid=AfmBOorVbjfBfIWPVW3euoelnAuDpYGm-zXoaqn8IWnM-vdqdMZ5MOEs>. (дата звернення 01.10.2025).

28. Кулабухов А.М., Гребенкіна О.А. Принципи побудови космічних апаратів: навчальний електронний посібник. – Д.: ДНУ, 2024. – 148 с.

29. GPS and Agriculture. URL: GPS Applications in Crop Production – Geospatial Technology. (дата звернення 01.10.2025).

30. Як підвищити ефективність внесення засобів захисту рослин? URL: <https://www.smartfarming.ua/yak-pidvyshchyty-efektyvnist-vnesennya-zasobiv-zakhystu-roslyn/>. (дата звернення 01.10.2025).

31. Системи паралельного водіння, Агронавігація. URL: <https://gpsgeometer.com/catalog/tractor-gps-gnss-guidance-systems?srsltid=AfmBOopKOUPEEIWR93TiLiTUlzbaxIinABtqiBkA3Sc9gpAIuMHYbvi3>. (дата звернення 01.10.2025).

32. Апаратні засоби для точного землеробства. Системи паралельного

водіння на базі GPS навігації. URL: <https://vseosvita.ua/lesson/aparatni-zasoby-dlia-tochnoho-zemlerobstva-systemy-paralelnoho-vodinnia-na-bazi-gps-navihatsii-458796.html>. (дата звернення 01.10.2025).

33. Аніскевич Л.В., Свірень М.О., Броварець О.О., Коваленко М.М., Косенко І.М. Система точного землеробства: Навчальний посібник. – Кропивницький. КОД. 2016.- 125с. URL: <https://sgm.kntu.kr.ua/file/content/11695/systema-tochnoho-zemlerobstva-navchalnyi-posibnyk-aniskevych-l-v-sviren-m-o-brovarets-o-o-kovalenko-m-m-kosenko-i-m-kropuvnytskyi-kod-2016-125-s-.pdf>. (дата звернення 01.10.2025).

34. Автопілоти. URL: <https://ags.in.ua/page/autopilots>. (дата звернення 10.10.2025).

35. Гідравлічні автопілоти. URL. <https://www.agrometer.com.ua/ua/gidravliche-skie-avtopiloti>. (дата звернення 10.10.2025).

36. AgGPS Autopilot system. URL <https://www.gpsags.com/products/guidance/aggps-autopilot-automated>. (дата звернення 10.10.2025).

37. Jian Ou, Dehai Yan, Yong Zhang, Echuan Yang, Dong Huang, Dong Huang. Research on the Stability Control Strategy of Distributed Electric Vehicles Based on Cooperative Reconfiguration Allocation. URL <https://www.mdpi.com/2032-6653/14/2/31>. (дата звернення 15.11.2025).

Додаток А. Ілюстративний матеріал

Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
(ХНАДУ)  
Факультет механічний  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

**ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**  
магістра

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДОРОЖНІМИ МАШИНАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ  
СИСТЕМ

Завідувач кафедри д-р техн.наук, проф.



О.Г. Гурко

Нормоконтролер канд.техн.наук, доцент



І.Г. Ільге

Керівник канд.техн.наук, доцент



А.Б. Бінковська

Студент гр. МА-61-24

О.О. Гнатенко

Харків - 2025

## ЗМІСТ

Постановка задачі.....	3
Схеми роботи системи GPS.....	4
Система паралельного водіння.....	5
Застосування автопілотів.....	6
Структурна схема руху колісної машини.....	7
Машинна схема моделювання кута повороту $\varphi$ передніх коліс.....	8
Машинна схема моделювання лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії.....	9
Машинна схема моделювання системи керування.....	10
Висновки.....	11

# *Постановка задачі*

Об'єкт - процес керування роботою будівельно-дорожніх машин з використанням GPS-навігаторів.

Предмет – система керування роботою будівельно-дорожніх машин з використанням GPS-навігаторів.

Мета роботи – підвищення ефективності роботи будівельно-дорожніх машин з використанням GPS-навігаторів.

Задачі:

- провести аналіз супутникової навігаційної системи;
- провести аналіз систему паралельного водіння;
- розглянути колісну машину як об'єкт керування;
- скласти структурну схему руху колісної машини;
- скласти машинну схему моделювання кута повороту передніх коліс;
- скласти машинну схему моделювання лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії;
- розробити машинну схему моделювання системи керування;
- провести моделювання.

Задачі дослідження вирішити методами аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

# Схеми роботи системи GPS

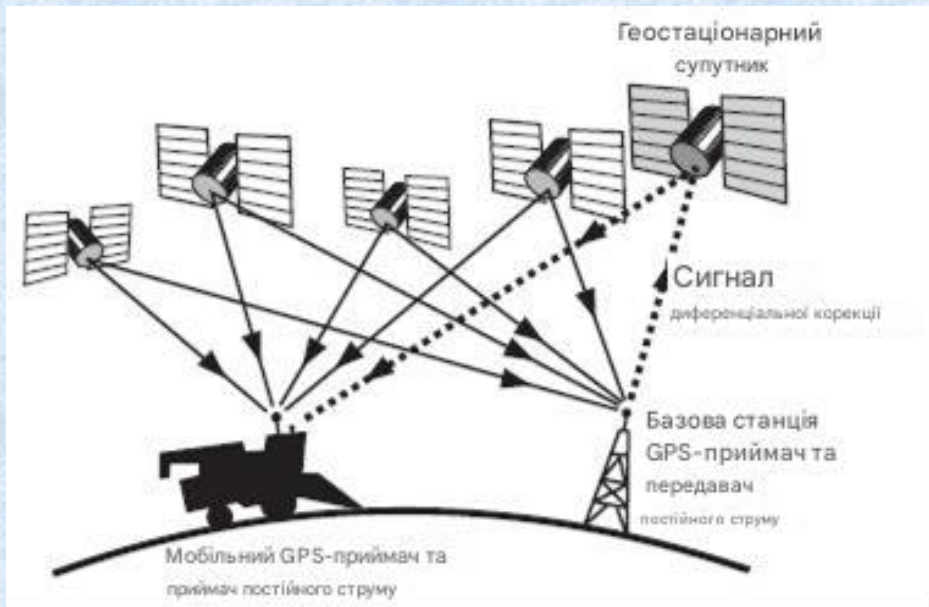
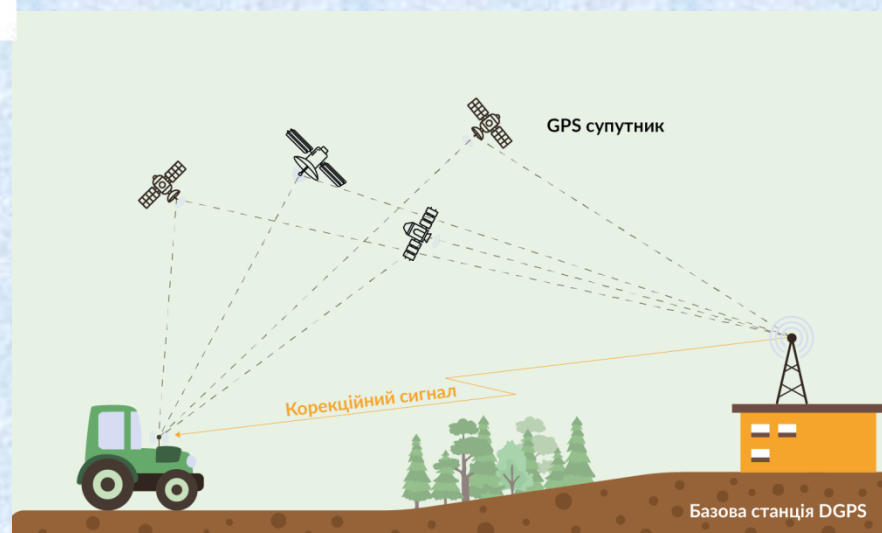
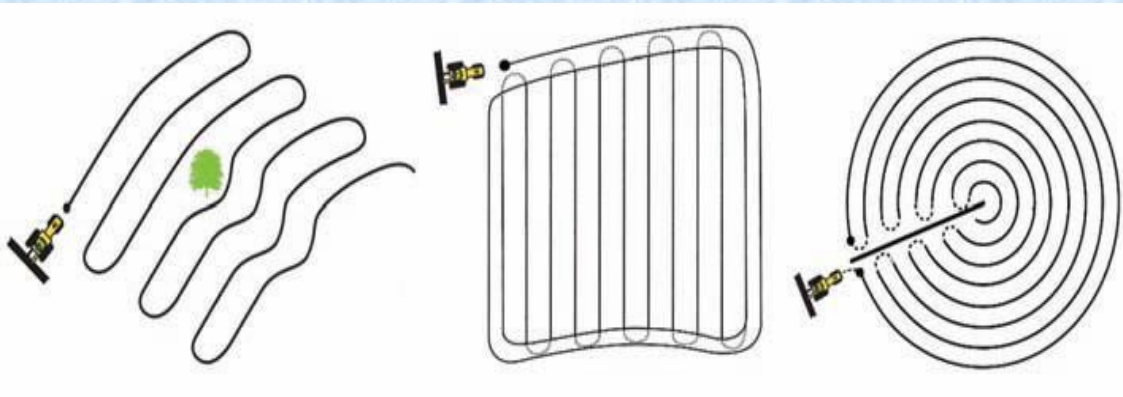


рисунок 1

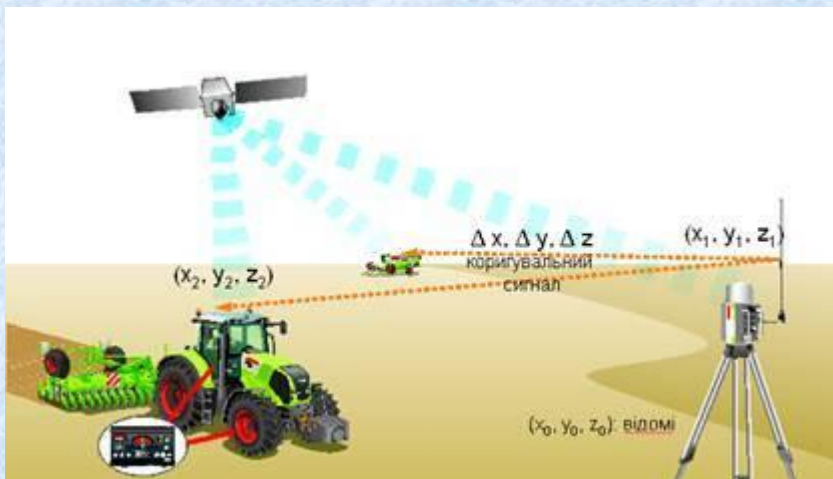
рисунок 2



# Система паралельного водіння



Сучасні системи з GPS - навігацією дозволяють запам'ятовувати не тільки кінцеві та початкові точки ряду, але й будь-яку криву в якості опорної лінії, дозволяє прокласти й відслідковувати як прямолінійні, так і криволінійні траєкторії, і їх комбінації.



# Застосування автопілотів



**Інтегрований дисплей AgGPS FmX Великий кольоровий дисплей** пропонує вбудовані два приймачі GPS + GLONASS та підтримує всі програми, що пропонуються Trimble.



**Світлова панель AgGPS<sup>®</sup> EZ-Guide<sup>®</sup> 500** із вбудованим двочастотним GPS-приймачем, що пропонує різні варіанти точності з режимами DGPS, OmniStar XP/HP та RTK.



**Приймач AgGPS 442 GNSS GLONASS** інтегрований 72-канальний приймач підтримує сигнали GPS, GLONASS, RTK та L1/L2/L2C/L5, ідеально підходить для складних умов, таких як пагорби та долини.



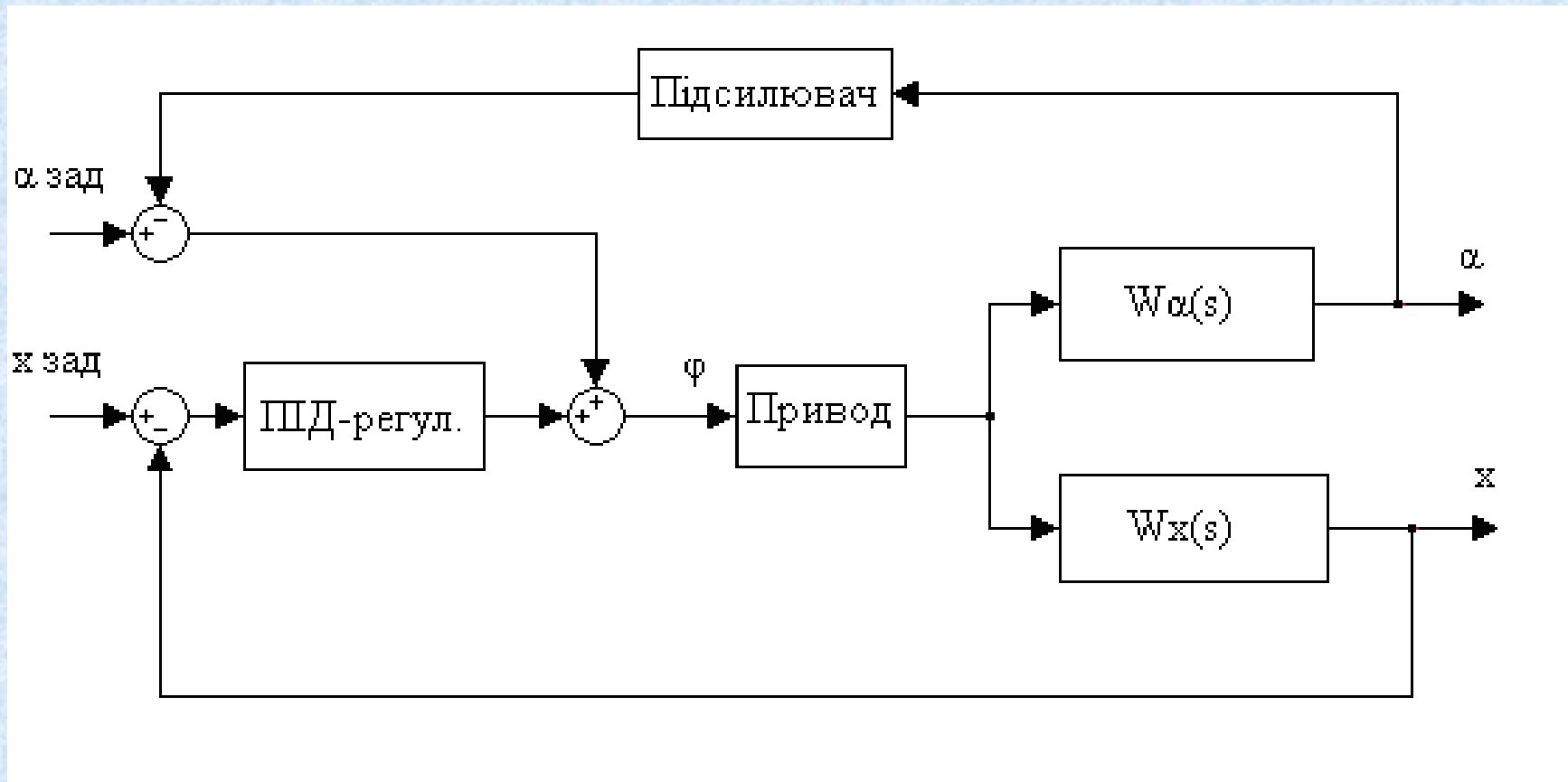
**GPS-приймач AgGPS 262** універсальний низькопрофільний GPS/DGPS/RTK приймач та антена, що підтримує RTK, OmniSTAR HP/XP, OmniSTAR VBS або SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS).

AgGPS NavController II підключається до більшості транспортних засобів, готових до навігації. Технологія T3 постійно коригує крен, тангаж та ривкування за допомогою найсучасніших 6-осових твердотільних інерційних датчиків, щоб забезпечити вам точне місцезнаходження на землі.

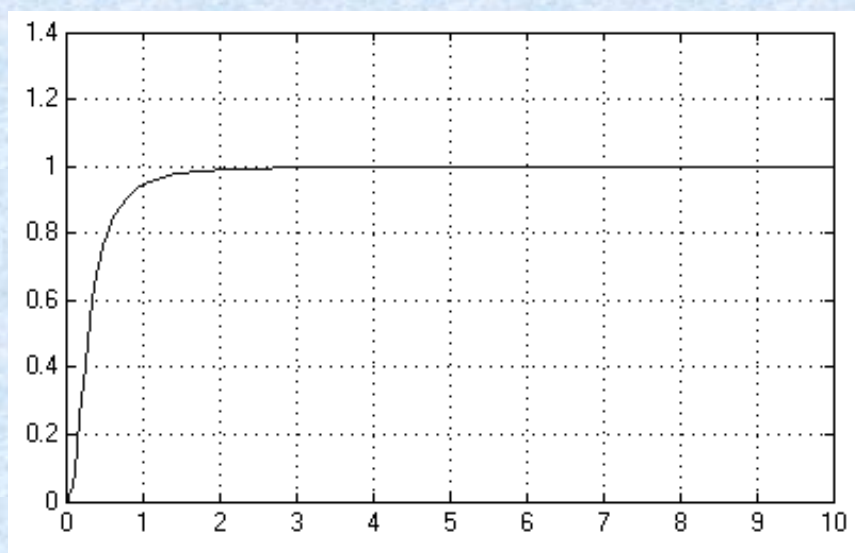
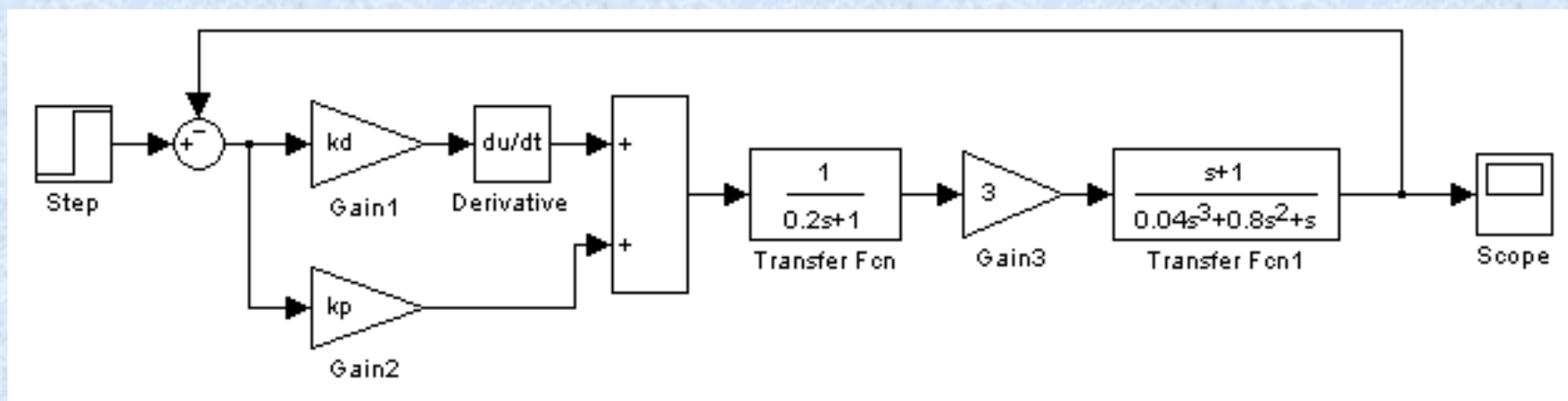
Інтерфейс транспортного засобу отримує навігаційні команди від AgGPS NavController II, які керують рульовим керуванням транспортного засобу під час його ввімкнення. Система автопілота підтримує ISO 11783, електропроводку, заводські компоненти автоматичного навігації або гідравлічні керуючі клапани Trimble.

Унікальний датчик рульового керування AgGPS Autosense вимірює високоточну інформацію про кут повороту коліс на будь-якій місцевості та конфігураціях рульового керування. Завдяки технології, на яку очікується патент, датчик рульового керування Autosense<sup>™</sup> отримує інформацію без використання рухомих частин або важелів, що забезпечує безпрецедентну надійність та продуктивність.

# Структурна схема руху колісної машини

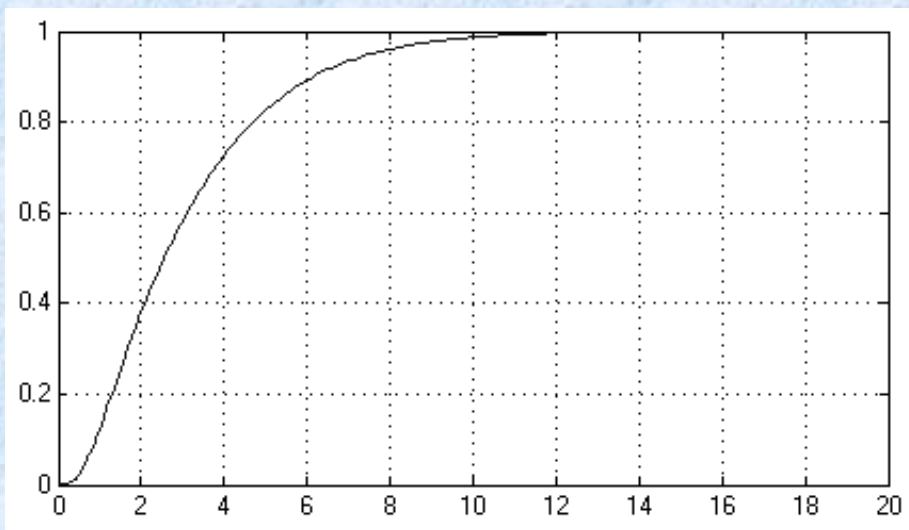
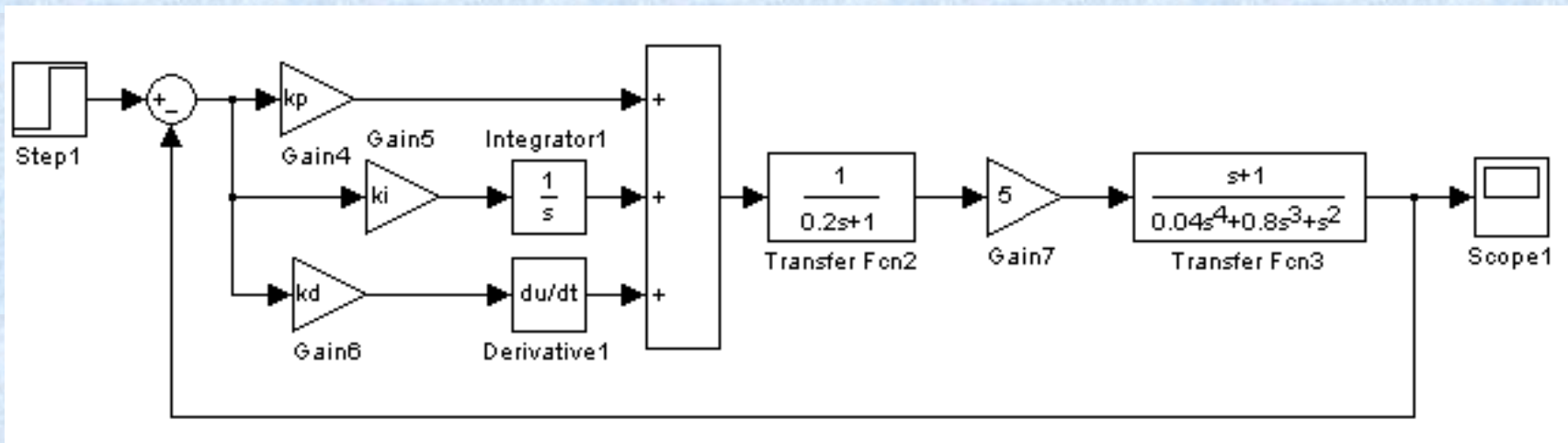


# Машинна схема моделювання кута повороту $\varphi$ передніх коліс



Графік перехідного процесу для кута повороту  $\varphi$  передніх коліс при коефіцієнтах  $k_d=0.4$  і  $k_p=1.8$ .

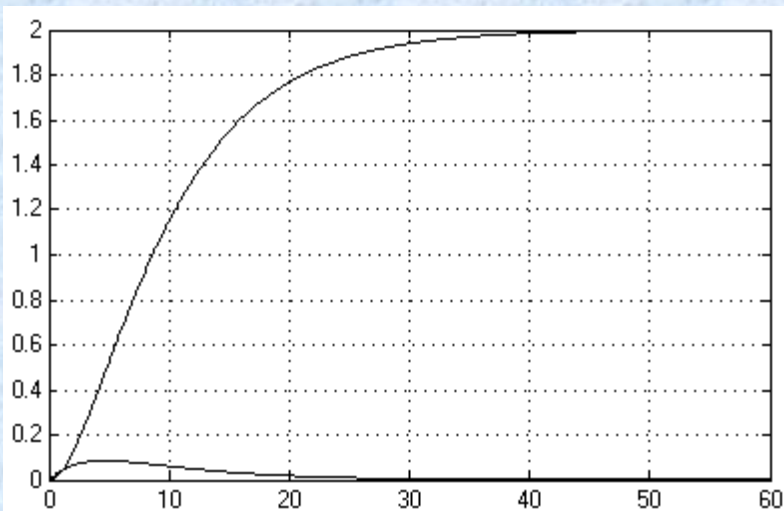
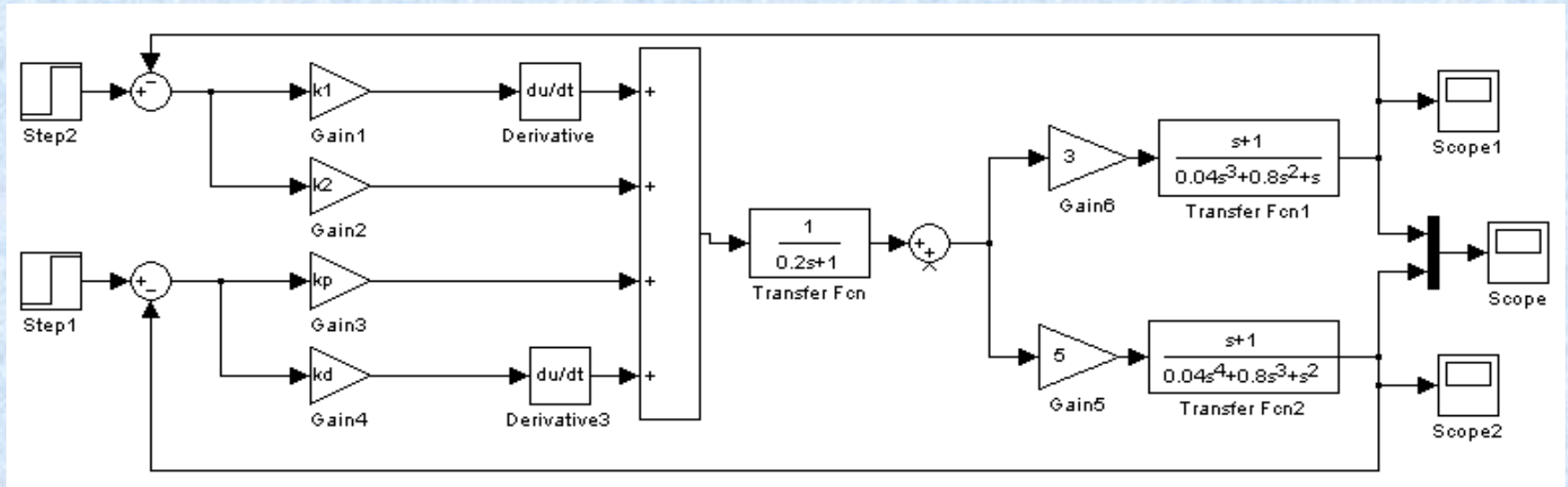
# Машинна схема моделювання лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії 9



Графік перехідного процесу для лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$  при  $k_p=0.08$ ,  $k_d=0.25$ ,  $k_i=0$ .

# Машинна схема моделювання системи керування

10



Графік перехідного процесу системи керування при  $k_1=1.67$ ,  $k_2=0.05$ ,  $k_p=0.05$ ,  $k_d=0.5$ .

Рішення навігаційних задач не менш важливо для сучасних рухливих об'єктів і для людства, загалом, ніж питання створення нових конструкцій, двигунів та інше. Тому розвиток техніки постійно вимагає створення надійних навігаційних приладів, здатних працювати не тільки на поверхні Землі, але й у далекому космосі і у морській безодні.

Використання супутникових технологій у дорожньому будівництві дуже ефективно. Застосування систем точного водіння має наступні переваги:

- зниження долі інженерних робіт;
- збільшення ефективності й продуктивності виробництва грабарств за рахунок значного зниження кількості проходів при підготовці проектної поверхні;
- економія палива й моторесурсу техніки;
- застосування автопілоту автоматизує процес керування БДМ;
- зниження неточностей обробки поверхонь.

Застосування систем навігації широко використовується при роботі дорожньо-будівельних машин. Таким чином, складне відсіпання ґрунту, підготовка крутих укосів і водоймищ при дорожньому будівництві або виконання асфальтування з автоматичним контролем поперечного ухилу, рівності й товщини покриття - усі види робіт виконуються однаково швидко й просто.

У даній роботі були розглянуті основи глобальної системи позиціонування GPS, принципи роботи й функції системи GPS, порівняні її характеристики з характеристиками інших супутникових навігаційних систем, розглянуто застосування супутникової навігації при роботі дорожніх машин, приведені основні прилади, які застосовуються, описані інноваційні GPS технології в сільському господарстві, та проведено моделювання кута повороту  $\varphi$  передніх коліс і лінійного відхилення об'єкта від заданої траєкторії  $x$ .