

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«____» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:

**«Синтез п'ятикоординатного робота з
приводом повороту руки зі штангами
змінної довжини»**

Виконав здобувач вищої освіти II-го
курсу групи ГМ-23М-3
ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
_____ Роман УСЕНКО

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА

Рецензент:

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-професійна програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ММіР

_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Романа УСЕНКА

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Синтез п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини

2. Керівник роботи: к.т.н., доцент Андрій ГРЕЧКА

3. Строк подання роботи до захисту 10 травня 2025 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи

Мета роботи: синтез п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини за умови мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

Завдання:

- огляд існуючих типів промислових роботів;
- аналіз тенденцій розвитку промислових роботів;
- вибір прототипів для пропонованої конструкції п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини;
- розробка схематичної конструкції п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини;
- визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини за умови мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі;
- розрахунок економічної ефективності від впровадження результатів роботи.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Дослідно- конструкторський	Андрій ГРЕЧКА		
Організаційно- економічний	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Патентний огляд.	12.02	вик.
2.	Огляд літературних джерел.	27.02	вик.
3.	Розробка схеми механізму і опис конструкції.	07.03	вик.
4.	Розробка схеми до синтезу приводу лінійних переміщень.	12.03	вик.
5.	Визначення конструктивних залежностей приводу лінійних переміщень.	19.03	вик.
6.	Розробка схеми до синтезу приводу кутових переміщень.	24.03	вик.
7.	Визначення конструктивних залежностей приводу кутових переміщень.	31.03	вик.
8.	Дослідження конструктивних залежностей.	09.04	вик.
9.	Розрахунок економічної ефективності.	19.04	вик.
10.	Оформлення пояснювальної записки.	29.04	вик.
11.	Оформлення презентації роботи	01.05	
12.	Здача роботи на кафедрі та перевірка на антиплагіат.	10.05	вик.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 20__ р.

Керівник роботи _____ Андрій ГРЕЧКА
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 20__ р.

Здобувач вищої освіти _____ Роман УСЕНКО
(підпис)

Анотація

УСЕНКО Роман. Синтез п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини. Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2025. – 81 с. Матеріали презентації 10 іл.

Запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини. Розроблено розрахункові схеми та отримано конструктивні залежності окремо для приводів лінійних та кутових переміщень. Проведено дослідження конструктивних параметрів п'ятикоординатного робота. Результати дослідження представлено у вигляді графіків.

Очікуваний економічний ефект у виробника продукції в складає 26300 грн, у споживача – 21300 грн.

Актуальність: запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини, що забезпечують його відповідність двом основним тенденціям розвитку робототехніки: застосування замкнених кінематичних ланцюгів та розміщення двигунів приводів на базисному елементі конструкції; отримано конструктивні залежності, що забезпечують задану рухомість механізму при мінімальних його габаритах.

Практичне значення: запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини та вивчено його конструктивні залежності для мінімізації габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у заданому робочому просторі.

Ключові слова: робот, паралельна кінематична структура, штанга змінної довжини.

Summary

USENKO Roman. Synthesis of a five-coordinate robot with a rotating arm drive with variable-length rods. Qualification work at the second (master's) level of higher education: CUNTU, 2025.– 81 p. Presentation materials 10 il.

It is proposed a new construction of a five-coordinate robot with a rotating arm drive with variable-length rods. Calculation schemes were developed and structural dependencies were obtained separately for linear and angular movements drives. The design parameters of a five-coordinate robot were studied. The results of calculations are presented in the form of graphs.

The expected economic effect for the producer of products is UAH 26,300, for the consumer – UAH 21,300.

Topicality: it is proposed a new construction of a five-coordinate robot with a rotating arm drive with variable-length rods, ensuring its compliance with two main trends in the development of robotics: the use of closed kinematic chains and the placement of drive motors on the basic element of the construction; design dependencies were obtained that ensure the specified mobility of the mechanism with its minimum dimensions.

Practical significance: it is proposed a new construction of a five-coordinate robot with a rotating arm drive with variable-length rods and its design dependencies have been studied to minimize overall dimensions while ensuring a given mobility in a given working space.

Keywords: robot, parallel kinematic structure, variable-length rod.

ЗМІСТ

	сторінка
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ТА ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ	10
1.1 Класифікація промислових роботів	10
1.2 Функціональне призначення, властивості, структура та основні визначення промислових роботів	12
1.3 Огляд прототипів на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами	26
1.4 Мета і задачі досліджень	31
РОЗДІЛ 2 СИНТЕЗ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА З ПРИВОДОМ ПОВОРОТУ РУКИ ЗІ ШТАНГАМИ ЗМІННОЇ ДОВЖИНИ	34
2.1 Опис пропонованої конструкції робота	34
2.2 Синтез приводу переміщення рухомої платформи	37
2.3 Синтез приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою)	44
2.4 Дослідження конструктивних залежностей робота	51
РОЗДІЛ 3 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА	62
3.1 Загальні вихідні дані	62
3.2 Визначення витрат на підготовку виробництва	63
3.3 Визначення повної собівартості та оптової ціни проектного робота	64
3.4 Визначення експлуатаційних витрат при застосуванні роботів	69
3.5 Розрахунок показників економічної ефективності	74
ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79
ДОДАТОК	82

ВСТУП

Актуальність роботи. Промислова робототехніка є однією з тих галузей, які динамічно розвиваються вже протягом тривалого часу. Велика різноманітність вирішуваних задач сприяла широкому впровадженню роботів у промисловість, що в свою чергу призвело до виникнення великої кількості їх конструкцій. При цьому потреби споживачів, які покликані задовольнити значна номенклатура роботів, часто стикаються з протилежними вимогами. Однак накопичений досвід при конструюванні, виробництві та експлуатації продукції робототехніки дозволяє засвідчити основні тенденції її розвитку. Очікувано вони корелюють з тенденціями розвитку більш широкої області виробництва і експлуатації технологічного обладнання різного спектру застосування. Зростання динамічних характеристик позитивно позначається на зростанні продуктивності роботи маніпуляторів, а також дотично призводить і до збільшення точності позиціонування його виконавчих органів. Ще одним дотичним наслідком зростання динамічних характеристик маніпуляторів є підвищення енергоефективності, оскільки зменшується вага переміщуваних елементів конструкції механізму, а отже сприяє економії електроенергії.

Тривалим часом одним із шляхів забезпечення зростання динамічних характеристик робототехніки є використання маніпуляторів з замкненими кінематичними ланцюгами та з розміщенням двигунів приводів на базисних елементах робота. Подібним вимогам у повній мірі задовольняє технологічне обладнання, побудоване на основі паралельних кінематичних структур. Розширення даного принципу також і для технологічного обладнання, призначеного для здійснення виробничих процесів з обробки матеріалів різанням, відкриває перспективи застосування модульного підходу до конструювання, виробництва і експлуатації технологічного обладнання. Використання базисного елемента поряд з додатковим оснащенням змінними модулями дозволить використовувати обладнання як для здійснення з

обробки матеріалів різанням, тк і для транспортних операцій, в залежності від потреб та вимог споживачів. Відтак подальший розвиток такого типу обладнання з гнучкими можливостями трансформації, розробка його нових конструкцій та проведення їх досліджень є актуальним науково-технічним завданням, що становить науковий інтерес та практичну цінність.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є синтез п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини за умови мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі. Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- огляд існуючих типів промислових роботів;
- аналіз тенденцій розвитку промислових роботів;
- вибір прототипів для пропонованої конструкції п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини;
- розробка схематичної конструкції п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини;
- визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини за умови мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

Додатково до поставленої мети розраховано економічну ефективність від впровадження робота пропонованої конструкції.

Об'єкт дослідження – п'ятикоординатний робот з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини.

Предмет дослідження – залежності конструктивних параметрів п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини.

Практичне значення – запропоновано нову конструкцію п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини на основі паралельних кінематичних структур та вивчено його конструктивні залежності для мінімізації габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у заданому робочому просторі.

Особистий внесок – розроблено схему та визначено конструктивні залежності п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини на основі паралельних кінематичних структур для мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у заданому робочому просторі.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ ТА ОГЛЯД ПРОТОТИПІВ

1.1 Класифікація промислових роботів

На нинішньому етапі розвитку техніки є загальноприйнятою щодо розділення понять «промисловий робот» і «маніпулятор». Так, промисловий робот – це машина, яка призначена працювати в автоматичному режимі, та має в своєму складі маніпулятор і пристрій програмного управління рухами останнього, головним призначенням якої є вивільнення людини при виконанні різноманітних операцій у виробничих процесах. Маніпулятором називають сукупність просторового (в більш простих випадках плоского) важільного механізму та системи приводів, які під управлінням від програмного пристрою чи за командами безпосередньо від людини-оператора здійснює необхідні дії у вигляді маніпуляції, які за своєю суттю виконують операції, що аналогічні результатам дій рук людини. Виходить, що «маніпулятор» є меншим за змістом поняттям, що характеризує сукупність механічної частини пристрою та системи приводних двигунів. «Промисловий робот» відтак є більш широким за змістом поняттям, бо додатково включає систему управління пристроєм.

Існують різноманітні кваліфікації промислових роботів. В якості такого прикладу наведемо класифікацію, в якій використано перелік ознак, що наведений у джерелі [1].

За характером виконуваних технологічних операцій:

- основні;
- допоміжні;
- універсальні.

За видом промислового виробництва:

- ливарні;

- зварювальні;
- кувально-штампувальні;
- для механічної обробки;
- складальні;
- фарбувальні;
- транспортно-складські;
- інші.

За системою координат руки маніпулятора:

- прямокутна;
- циліндрична;
- сферична;
- сферична кутова (ангулярна);
- комбінації означених.

За числом рухомостей маніпулятора:

- дворухомі (плоскі);
- трирухомі (плоскі чи об'ємні);
- чотирирухомі і більше (всі – об'ємні).

За вантажопідйомністю (умовно):

- надлегкі (до 10 Н);
- легкі (до 100 Н);
- середні (до 1000 Н);
- важкі (до 10000 Н);
- надважкі (понад 10000 Н).

За типом силового приводу:

- електромеханічний;
- пневматичний;
- гідравлічний;
- комбінації означених.

За рухомістю основи:

- мобільні;

- стаціонарні.

За видом програми управління:

- з жорсткою програмою;
- з можливістю перепрограмування;
- адаптивні;
- з елементами штучного інтелекту.

За характером програмування:

- позиційне;
- контурне;
- комбіноване.

Можна зазначити, що даний перелік ознак не є вичерпним, та може бути розширеним в залежності від специфіки застосування промислових роботів, коли можна виділити додаткові ознаки функціонування.

1.2 Функціональне призначення, властивості, структура та основні визначення промислових роботів

Основним функціональним призначенням маніпулятора як частини промислового робота є забезпечення руху вихідної ланки з закріпленим в ній об'єктом маніпулювання за визначеною траєкторією та з заданою орієнтацією у просторі. В максимальному випадку для виконання цих вимог важільний механізм маніпулятора повинен володіти щонайменше шістьма рухомостями (трьома лінійними та трьома кутовими), причому рух за кожною з цих рухомостей повинен бути строго керованим. В переважній більшості випадків наявність у промислового робота шести рухомостями значно ускладнює систему як з точки зору виготовлення, так і в процесі експлуатації. Все це негативно відображається на зростанні вартості робота, що переноситься на кінцеву продукцію, у виробництві якої він задіяний. Тому реальні конструкції промислових роботів часто виконуються як

механізми з числом рухомостей менше шести. Найбільш прості маніпулятори мають три, а у випадку плоских механізмів – то і дві рухомості. Очевидно, що такі маніпулятори будуть значно простішими і дешевшими у виготовленні, однак їх технологічна функціональність буде обмеженою. Це викликає додаткові вимоги до реалізації робочого простору маніпулятора. В більшості випадків такі прості конструкції є складовими робото-технологічних комплексів, в яких жорстко задається орієнтація як об'єктів маніпулювання, так і самих елементів маніпулятора у складі технологічної машини вищого рівня.

Для прикладу розглянемо структурну схему маніпулятора, що володіє трьома рухомостями. Основна частина такого маніпулятора складається з нерухокої ланки 0 та трьох послідовно сполучених рухомих ланок 1, 2 і 3, як показано на рис. 1.1.

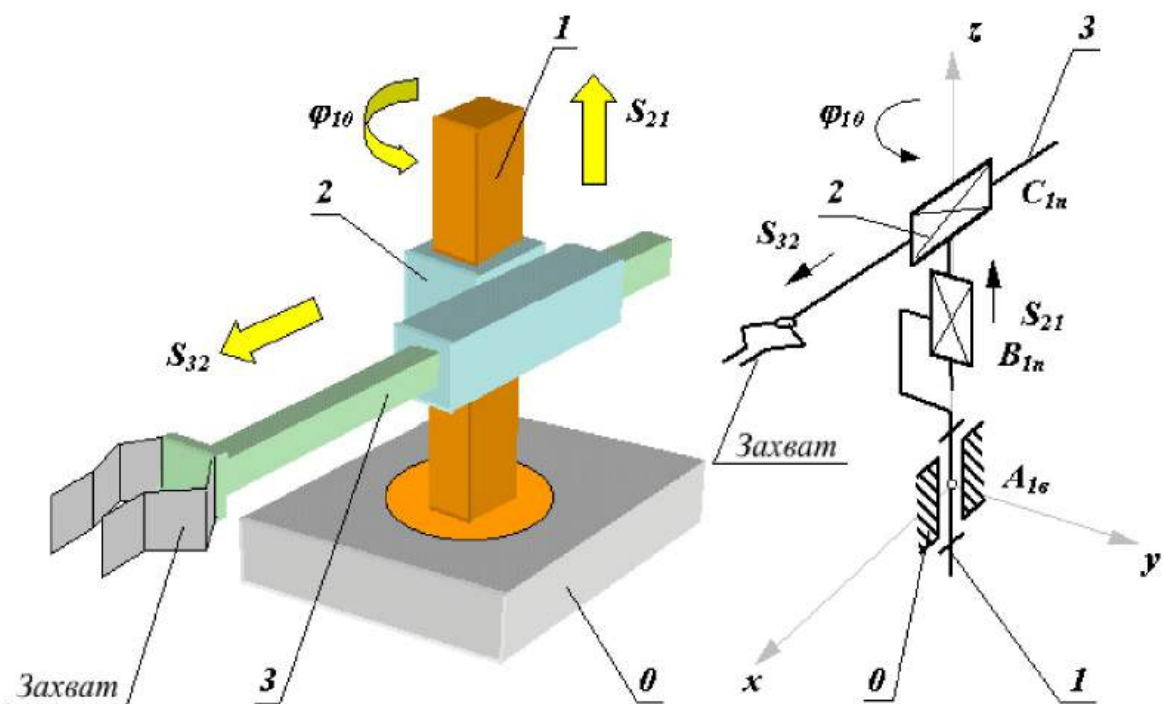


Рис. 1.1 – Структурна схема маніпулятора з трьома рухомостями

Для опису функціонування механізму цього маніпулятора найбільш зручною видається циліндрична система координат. У цій системі ланка 1

може обертатися щодо ланки 0 (відносний кутовий рух ϕ_{10}), ланка 2 переміщається по вертикалі щодо ланки 1 (відносний лінійний рух S_{21}) і ланка 3 переміщається в горизонтальній площині щодо ланки 2 (відносний лінійний рух S_{32}). На кінці ланки 3 кріпиться захватний пристрій або захват, функцією якого є захват і утримання об'єкта маніпулювання при переміщеннях елементів маніпулятора. Ланки основного важільного механізму маніпулятора утворюють між собою три однорухові кінематичні пари (одну обертальну А та дві поступальні В і С) та можуть функціонально забезпечити переміщення об'єкта в просторі без зміни його орієнтації. Для виконання кожного із трьох відносних рухів маніпулятор повинен бути оснащений відповідними приводами, що складаються з двигунів, за необхідності редукторів і системи датчиків зворотного зв'язку. Оскільки рух об'єкта здійснюється за наперед заданим законом руху, то в системі управління повинні бути пристрої, що задають і зберігають програму руху, так звані програмоносії. При управлінні від ЕОМ такими пристроями найчастіше виступають флешки, картки пам'яті, диски тощо. Перетворення заданої програми руху в сигнали управління двигунами здійснюється системою управління. Ця система включає ЕОМ, необхідне програмне забезпечення, цифроаналогові перетворювачі й підсилювачі сигналів. Система управління, відповідно до уведеної програми, створює й видає на виконавчі пристрої приводів (двигуни) керуючі сигнали u_i . При необхідності вона коректує ці сигнали по розходженнях Δx_i , які надходять до неї від датчиків зворотного зв'язку. Розглянута функціональна схема промислового робота наведена на рис. 1.2.

Для опису структури маніпуляторів часто використовують формульне представлення їх будови. Формула будови маніпулятора – це запис за математичними правилами структурної схеми маніпулятора, що містить інформацію про кількість його рухомостей, види кінематичних пар і їх орієнтацію відносно осей базової системи координат, тобто такої, що пов'язана з базисною нерухомою ланкою.

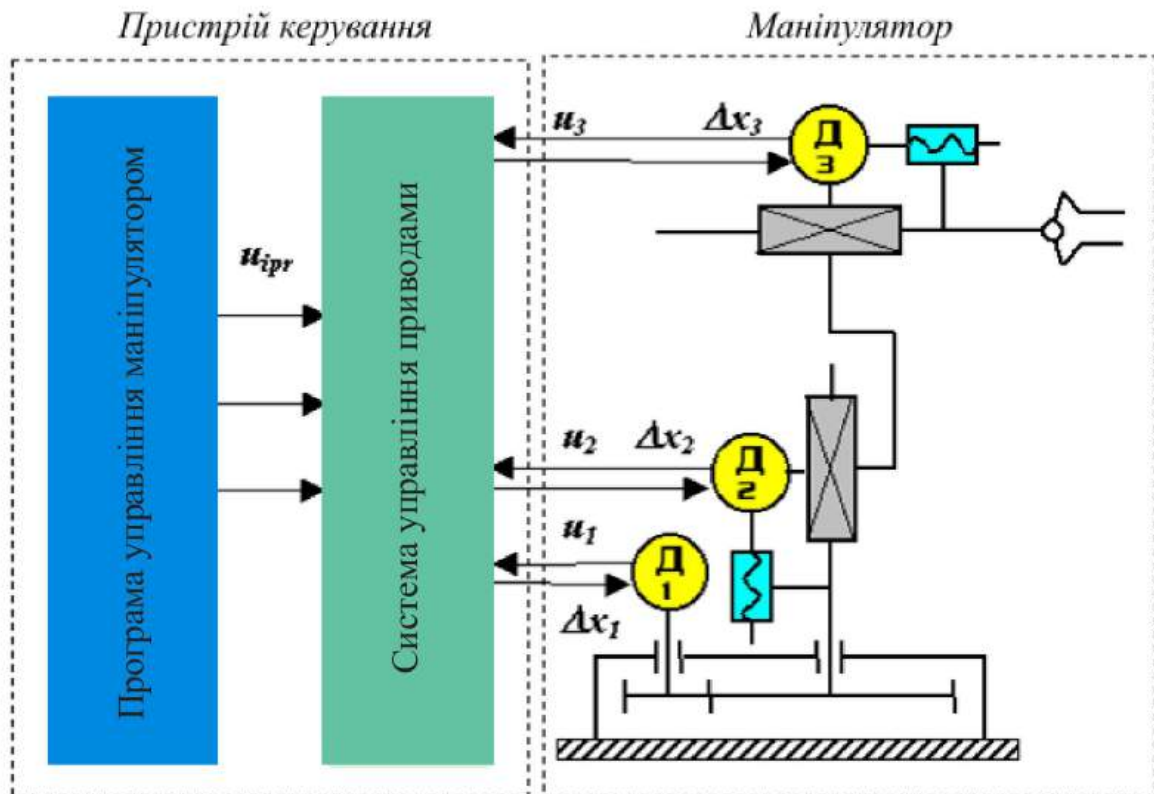


Рис. 1.2 – Функціональна схема промислового робота з трьома рухомостями

Прийнято розділяти рухи, які забезпечуються маніпулятором, на:

- *глобальні* (для робіт з рухомою основою) – це рухи стійки маніпулятора, які суттєво перевищують розміри механізму;
- *регіональні* (транспортні) – це рухи, що забезпечуються першими трьома ланками маніпулятора або його «рукою», величина котрих є співставною з розмірами механізму;
- *локальні* (орієнтуючі) – це рухи, що забезпечуються тими елементами маніпулятора, які утворюють його «кисть», величина яких набагато менше розмірів механізму.

У відповідності з наведеною класифікацією рухів в маніпуляторі можна виділити дві ділянки кінематичного ланцюга з різними функціями: механізм руки і механізм кисті. «Рукою» прийнято вважати ту частину маніпулятора,

яка забезпечує переміщення центру захвату – точки M (регіональні рухи захвату); «кистю» прийнято вважати ті ланки і пари, які забезпечують захват об'єкта маніпулювання (локальні рухи захвату).

Розглянемо структурну схему антропоморфного маніпулятора, тобто такого, який в першому наближенні відповідає функціонуванню руки людини (рис.1.3).

Цей механізм складається із трьох рухомих ланок і трьох кінематичних пар: двох трьохрухових сферичних $A_{3сф}$ і $C_{3сф}$ і однієї однорухової обертальної $B_{1в}$.

Кінематичні пари маніпулятора характеризуються: іменем або позначенням, та відображається заголовною буквою латинського алфавіту (А, В, С і т.д.); ланками, які утворюють пари (0/1, 1/2 і т.п.); відносним рухом ланок у парі (для однорухових пар - обертальний, поступальний або гвинтовий); рухомістю кінематичної пари (для нижчих пар від 1 до 3, для вищих пар від 4 до 5); віссю орієнтації осі кінематичної пари відносно осей прийнятої системи координат.

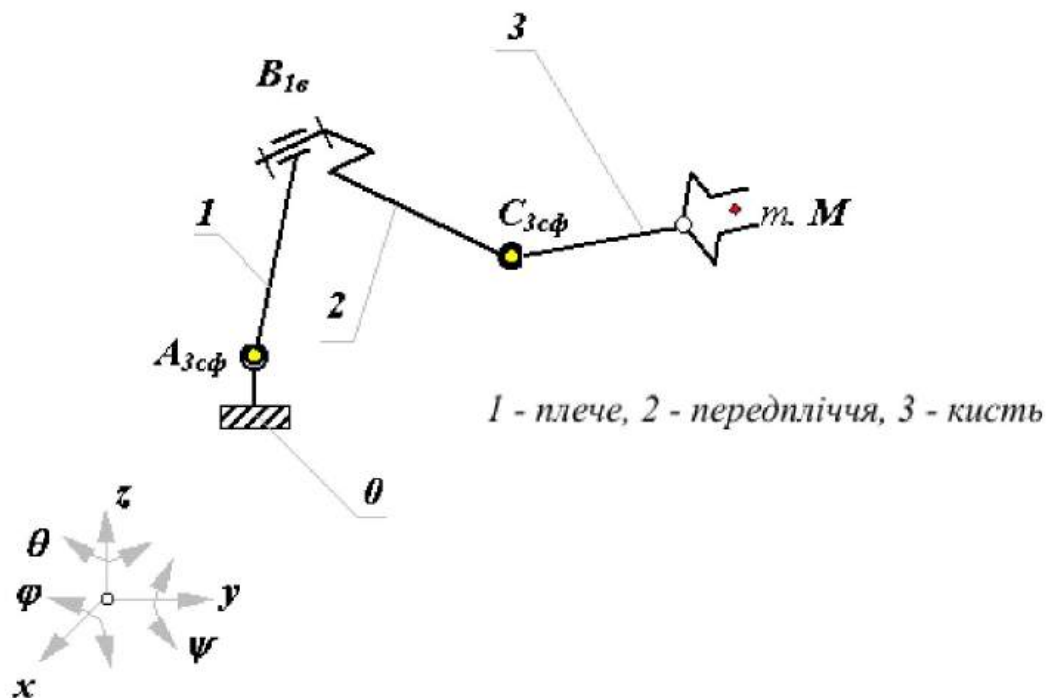


Рис. 1.3 – Схема антропоморфного маніпулятора

Наведемо наступні важливі поняття та визначення.

Робочий простір маніпулятора – це простір, який обмежений поверхнями, що є огинаючими до множини можливих положень його ланок.

Зона обслуговування маніпулятора – це простір, який відповідає множині можливих положень центру захвату маніпулятора. Зона обслуговування є важливою характеристикою маніпулятора. Вона визначається структурою й системою координат руки маніпулятора, а також конструктивними обмеженнями, що походять від відносних переміщень ланок у кінематичних парах.

Рухомість маніпулятора W – це число незалежних узагальнених координат, що будуть однозначно визначати розташування захвату в просторі. Визначається за формулою:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^5 (6 - i)p_i$$

Або у випадку використання незамкнених кінематичних ланцюгів:

$$W = \sum_{i=1}^5 i \cdot p_i$$

Маневреність маніпулятора M – це рухомість маніпулятора при зафіксованому (нерухомому) захваті:

$$M = W - 6$$

Можливість зміни орієнтації захвату при розміщенні його центра в заданій точці зони обслуговування характеризується кутом сервісу ψ , що його може описати остання ланка маніпулятора (ланка, на якій закріплено

захват) при фіксації центра захвата в заданій точці зони обслуговування. Для маніпулятора, схема якого наведена на рис. 1.3, він буде визначатися за формулою:

$$\psi = f_C / l_{CM}^2,$$

де f_C – площа сферичної поверхні, що описується точкою C ланки 3, l_{CM} – довжина ланки 3.

Відносна величина $k_\psi = \psi / (4\pi)$ називається коефіцієнтом сервіса.

Таким чином, для антропоморфного маніпулятора, схема якого наведена на рис. 1.3, його рухомість становить

$$W = 6 \cdot 3 - (3 \cdot 2 + 5 \cdot 1) = 18 - 11 = 7,$$

маневреність

$$M = 7 - 6 = 1,$$

формула побудови

$$W = [\Theta_{10} + \Phi_{10} + \Psi_{10}] + \Phi_{11} + [\Theta_{32} + \Phi_{32} + \Psi_{32}].$$

Структура кінематичного ланцюга маніпулятора повинна забезпечувати необхідне переміщення об'єкту маніпулювання в просторі з заданою орієнтацією. Для цього необхідно, щоб захват маніпулятора мав можливість виконувати рухи мінімум по шести координатам: трьом лінійним і трьом кутовим. Розглянемо на об'єкті маніпулювання точку M , яка співпадає з центром захвата. Розташування об'єкта в нерухомій (базовій) системі координат $Ox_0y_0z_0$ визначається радіус-вектором точки M і

орієнтацією одиничного вектора $\bar{A}$ з початком у цій точці. В математиці для визначення розташування точки у просторі може використовуватися одна з трьох систем координат:

- прямокутній декартовій з координатами x_M, y_M, z_M ;
- циліндричній з координатами r_{sM}, φ_M, z_M ;
- сферичній з координатами r_M, φ_M, θ_M .

Орієнтація об'єкта у просторі задається кутами α, β і γ , що їх одиничний вектор $\bar{A}$ утворює з осями базової системи координат. На рис. 1.4 представлено схему шестирукого маніпулятора з обертальними кінематичними парами з наведеними координатами об'єкта маніпулювання.

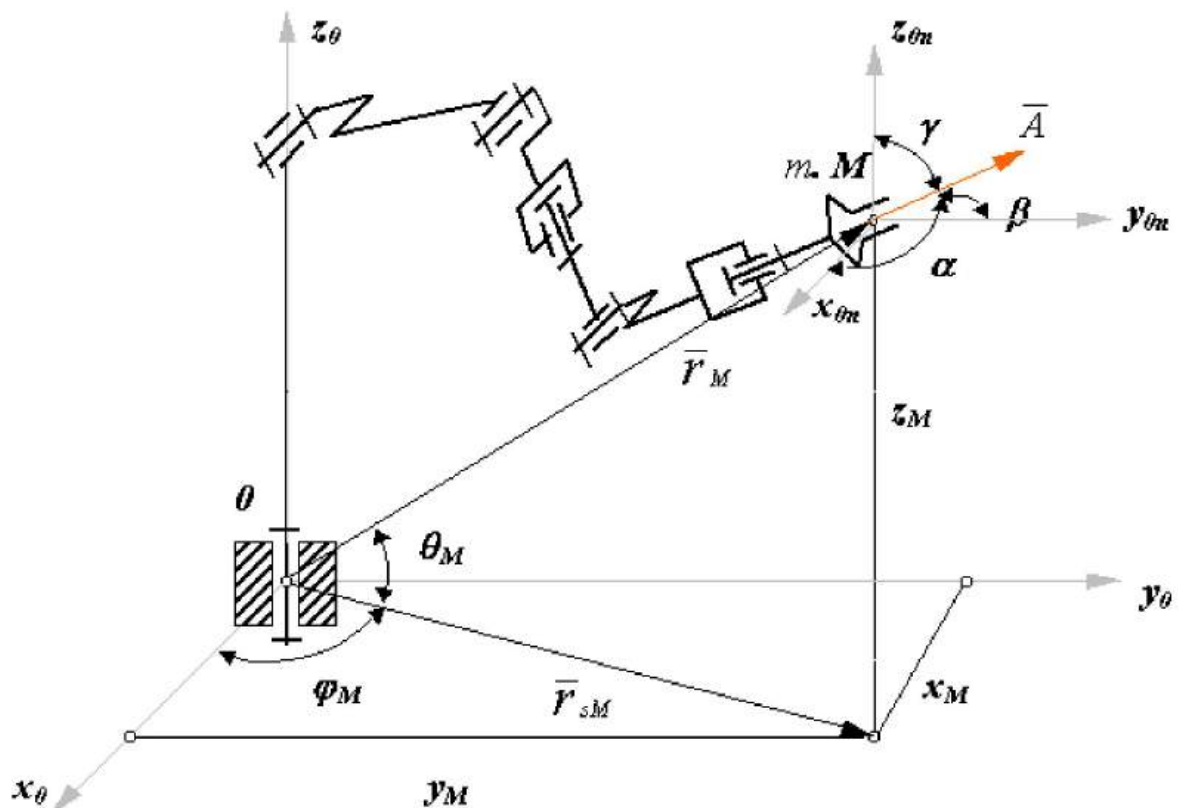


Рис. 1.4 – Умовне позначення координат об'єкта маніпулювання

При структурному синтезі механізму маніпулятора необхідно враховувати наступне:

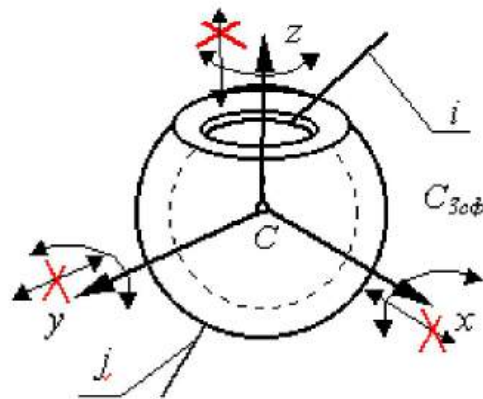
- кінематичні пари маніпуляторів забезпечуються приводами, що включають двигуни і пристрої гальмування, тому в схемах маніпуляторів, як правило, використовуються однорухові кінематичні пари: обертальні або поступальні;

- необхідно забезпечити не тільки задану рухомість захвату маніпулятора, але й таку орієнтацію осей кінематичних пар, яка б забезпечувала формування зони обслуговування необхідних розмірів і форми, а також робила більш простою та зручною програмування його рухів;

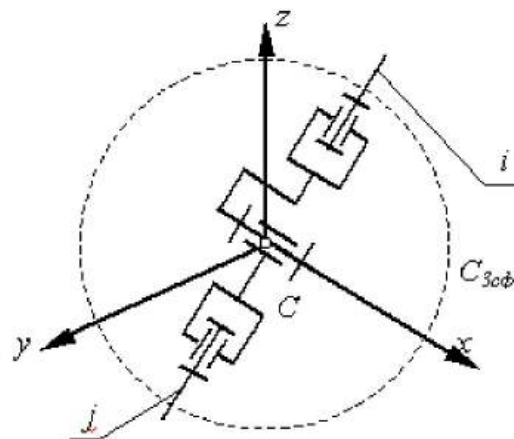
- при виборі орієнтації кінематичних пар необхідно враховувати розташування приводів (на основі або на рухомих ланках), а також за необхідності спосіб врівноваження ваги ланок.

При виконанні першої умови кінематичні пари з декількома рухомостями замінюють еквівалентними кінематичними з'єднаннями. Такий приклад у випадку сферичної пари наведено на рис. 1.5.

Переміщення захвату в просторі можна забезпечити, якщо орієнтувати осі перших трьох кінематичних пар по осях однієї з осей координат. При цьому вибір системи координат визначає тип руки маніпулятора й вид його зони обслуговування. В таблиці 1.1 наведені види систем координат для руки маніпулятора. В ній подано приклади структурних схем механізмів, що відповідають системам координат. Структурні схеми механізмів кисті, які найчастіше застосовуються в маніпуляторах, наведено в таблиці 1.2. Якщо приєднувати до вихідної ланки руки той чи інший механізм кисті, можна отримати більшість структурних схем маніпуляторів, які відомі з реальних конструкцій промислових роботів.



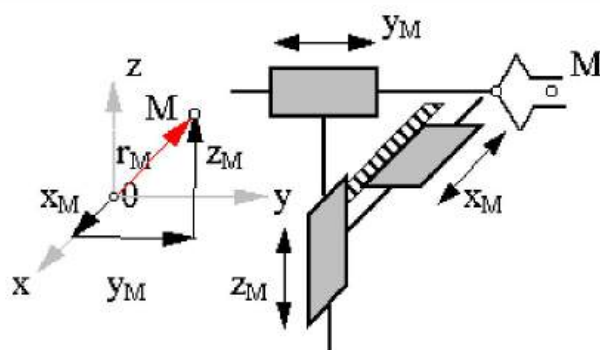
Сферична кінематична пара



Еквівалентне кінематичне з'єднання

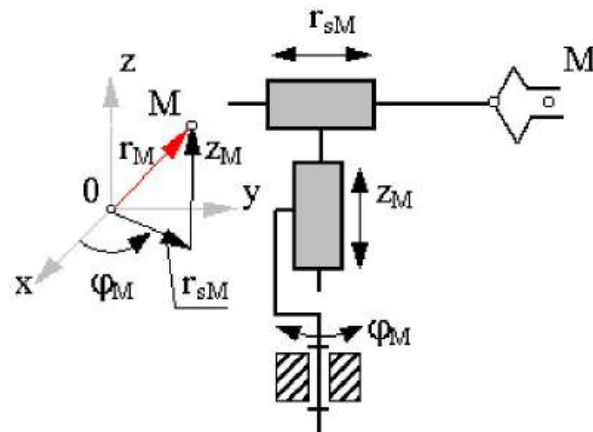
Рис. 1.5 – Заміна сферичної кінематичної пари еквівалентним кінематичним з'єднанням

Таблиця 1.1 – Системи координат «руки» маніпулятора

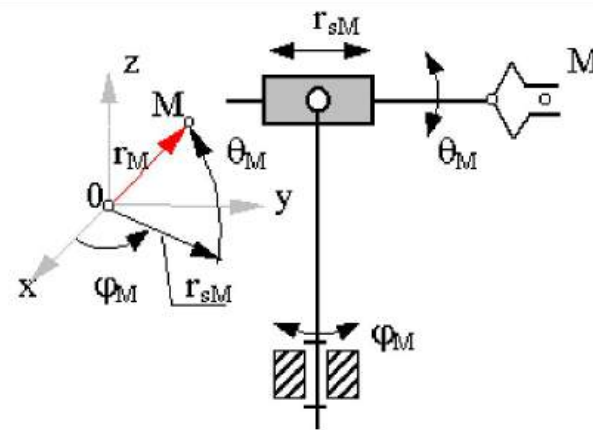


Прямокутна (декартова)

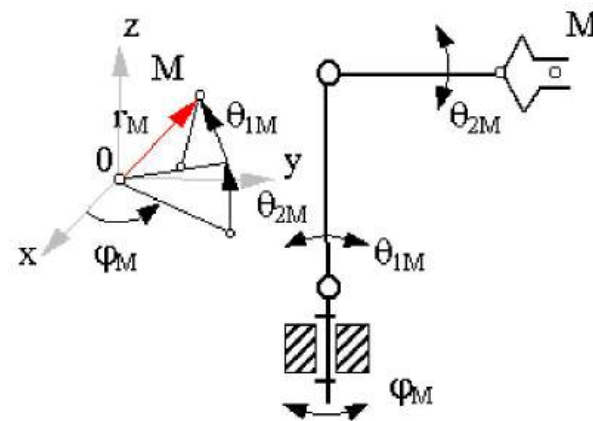
Продовження табл. 1.1



Циліндрична

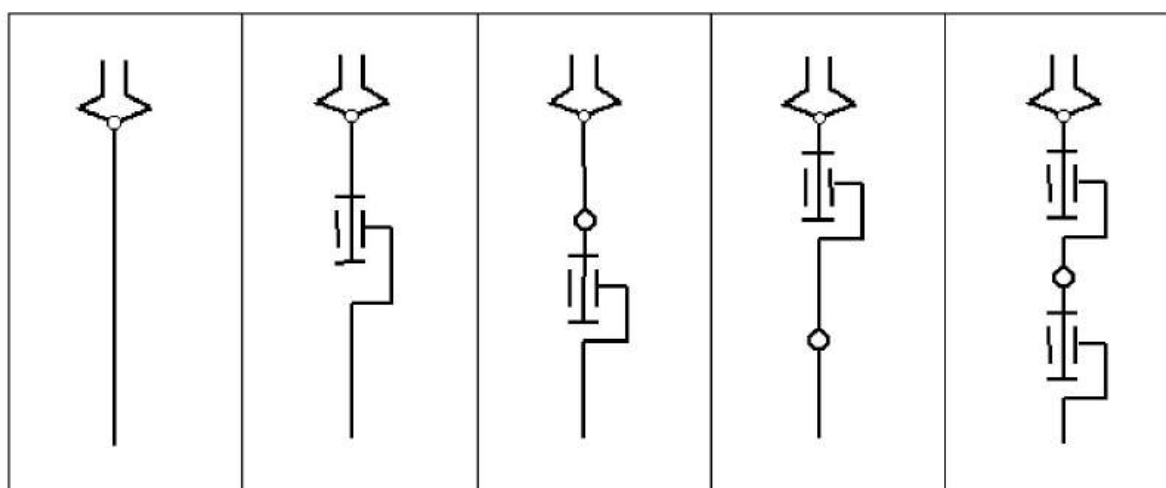


Сферична



Кутова (ангулярна)

Таблиця 1.2 – Структурні схеми кисті маніпулятора



Місце розташування приводів визначає структуру маніпулятора. Якщо приводи розташовувати безпосередньо в кінематичних парах, то до мас рухомих ланок маніпулятора будуть додаватися маси приводів. Відтак сумарне навантаження на приводи і їх потужність буде збільшуватися, а відношення маси маніпулятора до корисного навантаження (максимальній масі об'єкта маніпулювання) – зменшуватися. Тому при проектуванні промислових роботів приводи ланок руки, які найбільш потужні і володіють більшою масою, необхідно розташовувати ближче до основи робота. Для передачі руху від привода до ланки використовуються додаткові кінематичні ланцюги. Розглянемо схему руки маніпулятора промислового робота фірми ASEA (рис. 1.6). До трьохланкового механізму з ангулярною системою координат додані:

- для привода ланки 2 – найпростіший кулісний механізм, утворений ланками 4, 5 і 2;
- для привода ланки 3 – ланцюг, що складається з кулісного механізму (ланки 6, 7 і 8) і шарнірного чотирьохланкового механізму (ланки 8, 9, 2 і 3).

структурна схема механізму зажадала збільшення розмірів кінематичних пар, однак в результаті був отриманий істотний виграш по енергетичних і динамічних показниках.

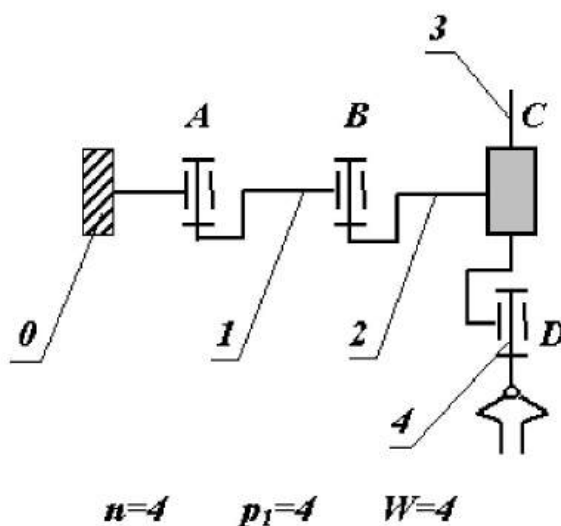


Рис. 1.7 – Схема руки маніпулятора SANCIO

Наведені приклади не охоплюють усіх можливих ситуацій раціонального вибору структури маніпуляторів. Вони тільки демонструють найбільш відомі із вдалих прийомів організації їх структури.

Важливою особливістю маніпуляторів є зміна структури механізму в процесі роботи. Відповідно до структурної схеми робота у деяких кінематичних парах додаються пристрої гальмування. При цьому дві ланки механізму за програмою можуть жорстко з'єднуватися одна з одною, утворюючи одна ланку. Таким чином зі структурної схеми механізму виключається одна кінематична пара і одна ланка, а число рухомостей захвата механізму буде зменшено на одиницю. Змінюється структура механізму і у тих випадках, коли в процесі виконання робочих операцій, наприклад, при складанні або зварюванні, захват з об'єктом маніпулювання стикається з нерухомими навколишніми предметами, утворюючи з ними кінематичні пари. Кінематичний ланцюг механізму замикається, а число рухомостей зменшується. У цьому випадку в ланцюзі можуть виникати

надлишкові зв'язки. Ці структурні особливості маніпуляторів необхідно враховувати при програмуванні роботи промислового робота.

Швидкодія промислового робота визначається максимальною лінійною швидкістю переміщень центру захвата маніпулятора. Прийнято розрізняти промислові роботи із малою ($V_M < 0.5$ м/с), середньою ($0.5 < V_M < 1.0$ м/с) і високою ($V_M > 1.0$ м/с) швидкістю. На даний момент промислові роботи в основному забезпечують середню швидкість і тільки близько 20% – високу. Подальше зростання частки роботів з високою швидкістю пов'язане в основному з раціоналізацією розташування приводів кінематичних ланок, зокрема, впровадженням паралельної кінематичної структури.

Точність маніпулятора промислового робота характеризується абсолютною лінійною погрешністю позиціонування центру захвата. Промислові роботи діляться на групи з малою ($\Delta r_m > 1$ мм), середньою (0.1 мм $< \Delta r_m < 1$ мм) і високою ($\Delta r_m < 0.1$ мм) точністю позиціонування. Запровадження механізмів з паралельними кінематичними структурами також може сприяти підвищенню точності позиціонування.

1.3 Огляд прототипів на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами

Огляд основних характеристик та властивостей, показаний в попередньому пункті, продемонстрував, що промислові роботи з розміщенням приводів на базисній деталі та зі структурою із замкненими кінематичними ланцюгами мають більш високі характеристики жорсткості та забезпечують вищу точність позиціонування. Побудова маніпуляторів на основі механізмів з паралельними кінематичними структурами дозволить уникнути нагромадження мас рухомих ланок маніпуляторів від базисної деталі до виконавчого органу. Розглянемо деякі приклади механізмів, побудованих на основі паралельних кінематичних структур, що на нашу

думку можуть бути використані як прототип для нової конструкції промислового робота.

Першим розглянемо верстат з комбінованою кінематикою, опис якого наведено у роботі [2]. Це винахід, метою якого є підвищення рухомості вихідного органа, який оснащено шпинделем, з приводом його переміщень на основі паралельних кінематичних структур з чотирма штангами постійної довжини шляхом розділення штанг на функціональні групи та забезпечення довільного взаємного просторового розташування шпинделя відносно заготовки, особливо у випадку надання цій заготовці за допомогою поворотного столу можливості обертання.

Вказана мета досягається тим, що у пропонованому рішенні вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром, причому три штанги постійної довжини приєднується до однієї частини вихідного органу і володіють конструкцією, яка забезпечує переміщення цієї частини вихідного органу по трьом лінійним координатам без зміни кутової орієнтації відносно базисної системи координат, а інша одна штанга постійної довжини приєднана до другої частини вихідного органу, причому саме ця частина містить шпиндель, вісь обертання якого в одному з кутових положень співпадає з віссю можливого (уявного) обертання заготовки.

Схема такого верстата з комбінованою кінематичною структурою приведена на рис 1.8.

В якості базисної деталі верстата обрано станину 1, на якій розміщено три приводи подачі 2 штанг 3 та один привод подачі 4 штанги 5. Всі штанги пов'язані шарнірно з вихідним органом, що складається з двох частин 6 і 7, причому частина 7 містить шпиндель 8. Частини 6 і 7 поєднані між собою за допомогою шарніру 9. Штанги 3 пов'язані з однією частиною 6 вихідного органа, а штанга 5 – з іншою частиною 7 вихідного органа. Конструкція штанг 3 та їхніх шарнірів така, що забезпечує переміщення частини 6 вихідного органу виключно по трьом лінійним координатам, без зміни

кутової орієнтації відносно станини. На станині також може встановлюватися поворотний стіл 10, що забезпечує обертання заготовки 11.

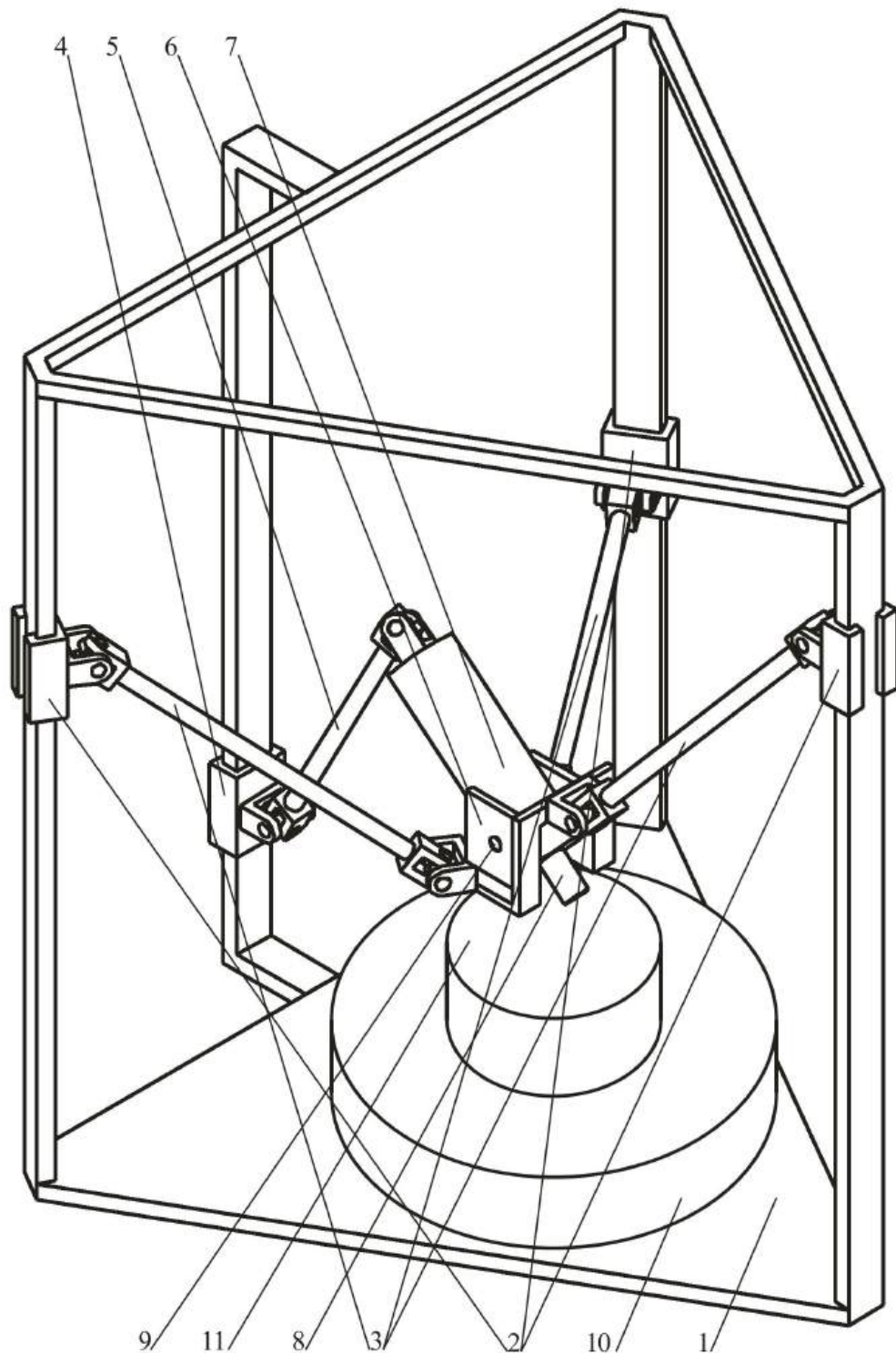


Рис. 1.8 – Схема верстата з комбінованою кінематикою

Переміщення штанги 5 визначатиме взаємне кутове положення частин 6 і 7 вихідного органа, тобто кут повороту частини 7 вихідного органу відносно його частини 6, поворот якої неможливий. Відповідно відбувається функціональне розділення приводів штанг на групи: приводи подач 2 штанг 3 визначають положення вихідного органа по лінійним координатам, а привод подачі 4 штанга 5 – по кутовій координаті.

Можливість лінійних переміщень шпинделя 8 у просторі у поєднанні з функцією повороту та на додачу обертальний рух заготовки 11 у пропонуваному рішенні забезпечує довільне взаємне просторове розташування інструменту, який розміщено у шпинделі, відносно заготовки, що значно розширює технологічні можливості верстата, наближаючи їх до максимальних.

Ще для прикладу можна провести огляд п'ятикоординатного механізму паралельної структури з трьома напрямними, опис якого наведено у роботі [3]. Це винахід, метою якого є забезпечення рівномірного розташування напрямних навколо зони обробки для уникнення перетину штанг, що входять до складу п'яти приводів подач, при забезпеченні необхідної рухомості вихідного органа у випадку скорочення кількості напрямних.

Вказана мета досягається тим, що у пропонуваному рішенні кількість напрямних переміщень повзунів становить три, причому на двох з них розміщується по два повзуни, один з яких входить до складу приводу лінійних переміщень однієї з частин вихідного органа, а кутова її орієнтація у будь-якому положенні залишається незмінною, а другий – до приводу повороту тієї його частини, що містить в собі шпиндель, та може обертатися навколо двох з трьох осей координат.

Схема п'ятикоординатного механізму паралельної структури з трьома напрямними приведена на рис. 1.9.

В якості базисної деталі верстата обрано станину 1, до якої прикріпленні три напрямні 2, розташовані рівномірно навколо зони обробки 3, що представлена на рисунку штрихпунктирною лінією з двома точками.

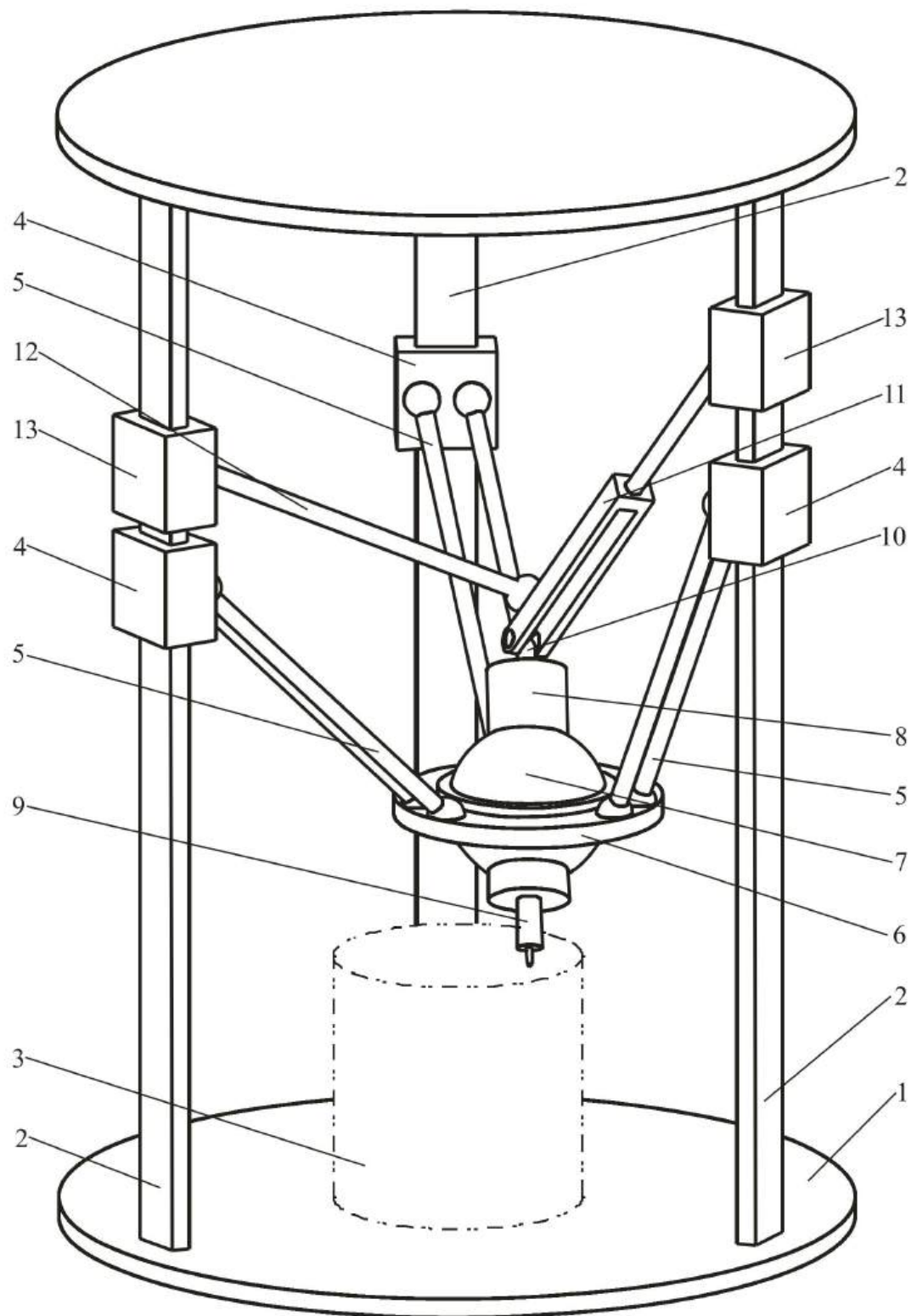


Рис. 1.9 – Схема п'ятикоординатного механізму паралельної структури з трьома напрямними

На зазначених напрямних розміщено три повзуни 4, які через пари штанг 5 пов'язані з однією з частин 6 вихідного органа. З цією частиною за допомогою шарніра 7 з двома степенями свободи пов'язується інша частина 8 вихідного органа, що містить в собі шпindel 9. На торці частини 8 вихідного органа, що протилежна передньому кінцеві шпинделя 9, розташовано оригінальний здвоєний шарнір 10, що за допомогою двох одиничних штанг 11 і 12 пов'язаний з двома повзунами 13. Повзуни 13 відповідно до поставленої мети розміщуються на напрямних 2 механізму.

Переміщення трьох повзунів 4 забезпечують лінійні переміщення однієї з частин 6 вихідного органа, забезпечуючи незмінність її кутової орієнтації відносно станини 1. Переміщення двох повзунів 13 забезпечують поворот тієї частини 8 вихідного органа, що містить в собі шпindel 9, у дозволених шарніром 10 межах навколо двох осей координат. Наявність шарніра 10 забезпечує функціональне розділення управління переміщеннями вихідного органу. Система управління повинна убезпечити повзуни 4 і 13, які розміщені на одній напрямній 2, від небезпечного стикання. Оригінальна конструкція шарніру 10 дозволяє взаємний поворот штанг 11 і 12 одна відносно іншої та відносно осі шпинделя 9 у необхідних межах.

Наведені винаходи показують можливість розробки нової конструкції маніпулятора з переміщенням його руки по трьом лінійним координатам, поворотом в одній площині та навколо своєї повздовжньої осі, що забезпечуватиме поворот кисті.

1.4 Мета і задачі досліджень

Наведена в огляді класифікація промислових роботів показує широку різноманітність областей їх використання. Така різноманітність породжує велику кількість конструкцій маніпуляторів, що безпосередньо пов'язана з великим колом питань, які вирішуються за допомогою робототехніки.

Водночас в огляді зазначено, що сучасні тенденції розвитку технологічного обладнання для виконання транспортних операцій зосереджуються навколо мінімізації переміщуваних мас, що виражається в тенденції розташування всіх двигунів приводів на базисних деталях маніпулятора, та використанні замкнених кінематичних ланцюгів, що призводить до помітного покращення характеристик жорсткості та точності позиціонування. Варто зазначити, що аналогічні тенденції спостерігаються і в наближеній до роботобудування сфері верстатобудування, де вимоги до жорсткості конструкції обладнання для здійснення відповідних технологічних операцій обробки деталей ще вищі. Це призвело до стрімкого розвитку механізмів на базі паралельних кінематичних структур.

Незважаючи на подібність тенденцій розвитку двох близьких сфер машинобудування, варто зазначити одну важливу відмінність. Детальний аналіз кінематики обладнання обох типів дозволяє стверджувати, що існує однакове за функціональним призначенням використання всіх координат руху, незалежно від обраної їх системи, окрім однієї. Ця відмінна координата – обертання навколо осі шпинделя. Відомо, що у обладнанні для виконання операцій механічної обробки обертання навколо осі шпинделя – це головний рух, що відбувається з великою швидкістю. Якщо такий рух і застосовується в якості руху подачі, то тільки для попередньої орієнтації шпинделя при виконанні доволі обмеженого кола технологічних операцій. В переважній більшості випадків операцій механічної обробки такий рух подачі взагалі не використовується. Аналогічним рухом в обладнанні для здійснення транспортних операцій є поворот кисті для орієнтації об'єкта маніпулювання. Для такого типу обладнання цей рух навпаки є розповсюдженим. Якщо ж взяти за необхідність принцип швидкого переналаджування із транспортної машини в технологічну і навпаки, дану відмінність необхідно враховувати. Механізми з паралельними кінематичними структурами дозволяють, на нашу думку, таку

трансформацію зробити найбільш просто, що робить таку задачу актуальною з практичною цінністю.

Метою даної роботи є синтез п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини за умови мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- огляд існуючих типів промислових роботів;
- аналіз тенденцій розвитку промислових роботів;
- вибір прототипів для пропонованої конструкції п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини;
- розробка схематичної конструкції п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини;
- визначення конструктивних залежностей п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини за умови мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

Додатково до поставленої мети розрахувати економічну ефективність від впровадження п'ятикоординатного робота пропонованої конструкції.

РОЗДІЛ 2

СИНТЕЗ П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА З ПРИВОДОМ ПОВОРОТУ РУКИ ЗІ ШТАНГАМИ ЗМІННОЇ ДОВЖИНИ

2.1 Опис пропонованої конструкції робота

В попередньому розділі було наведено дві конструкції роботів, які варто розглянути в якості прототипів для нашої конструкції. Звернемо увагу на те, що спільною конструктивною рисою в них є рухома платформа, система приводу подачі якої забезпечує переміщення даного органу по трьом лінійним координатам без зміни кутового положення відносно станини. Прийmemo принцип забезпечення лінійних переміщень виконавчого органа окремим елементом (в даному випадку – рухомою платформою) за основу і нашої конструкції. З джерела [2] відомо, що даний принцип дозволяє функціонально розділити управління лінійними та кутовими переміщеннями вихідного органа в механізмах з паралельною кінематичною структурою.

Розглянемо детально необхідні кутові переміщення руки. Одним з обов'язкових рухів буде поворот кисті навколо осі руки. Для розширення функціоналу робота доцільно забезпечити поворот руки робота у площині, перепендикулярній до площини рухомої платформи. В якості прикладу такого переміщення обираємо поворот вихідного органу в механізмі з роботи [2]. Таким чином, нам необхідно два приводи для відтворення кутових переміщень руки робота разом з його кистю на додачу до трьох приводів, що забезпечуватимуть лінійне переміщення рухомої платформи.

Кутові переміщення пропонованого робота будемо реалізовувати за принципом, подібним до використаного у роботі [3], тобто одночасним управлінням двох координат. Однак для реалізації таких приводів обираємо інший конструктивний підхід, а саме використання двох штанг змінної довжини. Схематично пропонована конструкція п'ятикоординатного робота представлена на рис. 2.1.

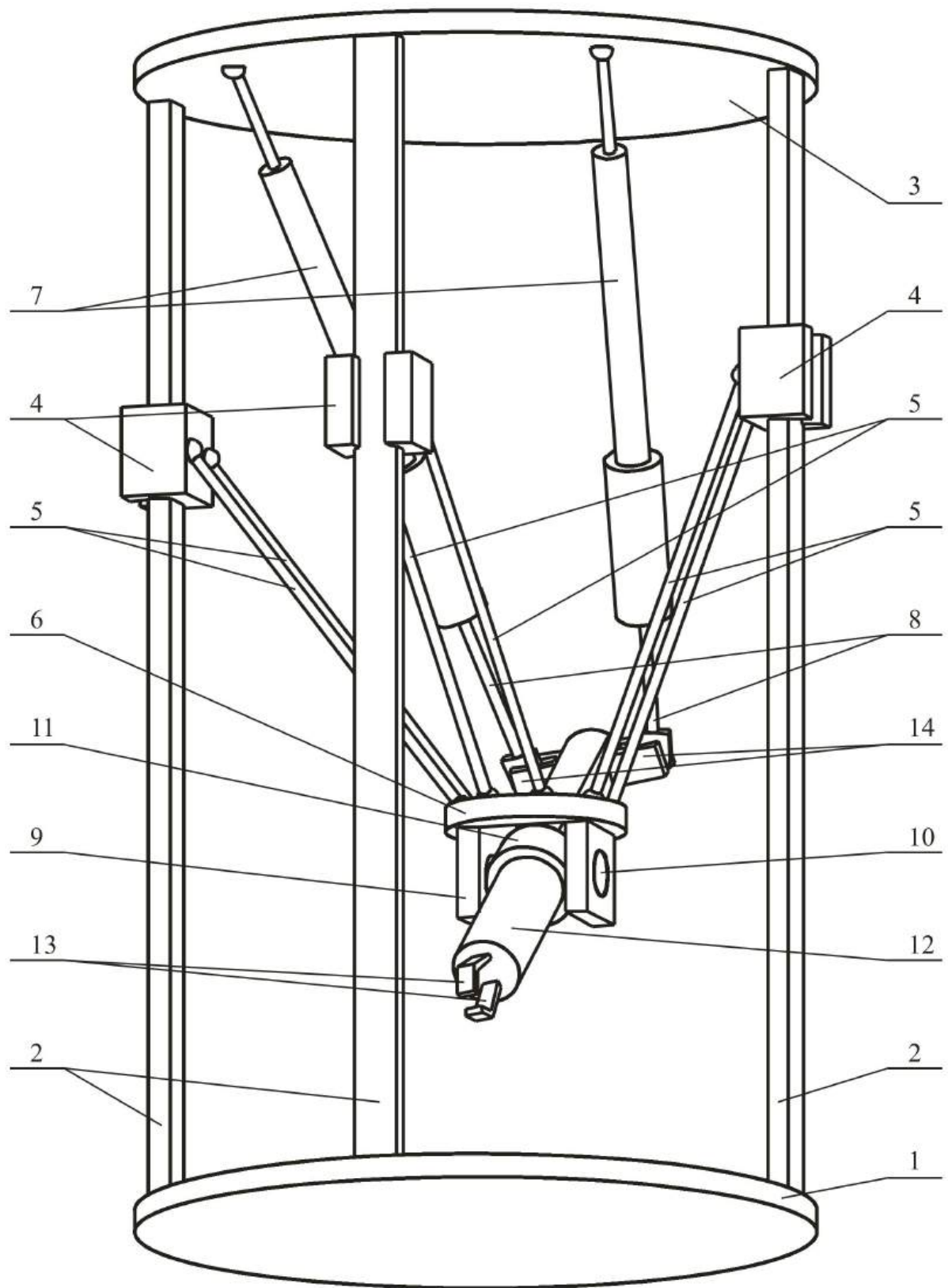


Рис. 2.1 – Схема будови робота пропонованої конструкції

Базисним елементом конструкції робота приймаємо основу 1. До основи 1 перпендикулярно приєднуються три вертикальні напрямні 2. У верхній частині конструкції напрямні 2 поєднуються кришкою 3, наприклад, як показано на даній схемі, у вигляді диску. По напрямним 2 рухаються повзуни 4 переміщення пар штанг постійної довжини 5, які приєднуються до даних повзунів шарнірно. Іншими кінцями пари штанг постійної довжини 5 приєднані до рухомої платформи 6. Довжини штанг у кожній зазначеній парі однакові, рівні також і відстані між центрами шарнірів, якими дані штанги кріпляться до рухомої платформи 6 та до повзунів 4. Таким чином утворюються три шарнірні паралелограми. В роботі [16] показано, що використання в такому випадку трьох шарнірно поєднаних паралелограмів забезпечують переміщення рухомої платформи 6 виключно по трьом лінійним координатам, без зміни її кутової орієнтації відносно основи 1. До кришки 3 шарнірно кріпляться два приводи 7 зміни довжини одиничних штанг 8. На двох кронштейнах 9 рухомої платформи 6 розташовані два поворотні шарніри 10, до яких кріпиться корпус підшипника 11. У даному підшипнику 11 обертається рука 12, на кінці якої розміщується кисть (захватний пристрій) 13. Для забезпечення необхідних поворотів руки 12 у підшипнику 11 та поворотних шарнірах 10 відносно рухомої платформи 6 на іншому кінці руки 12, що є протилежним розташуванню кисті (захватного пристрою) 13, розташована пара вилок 14. Кожна з цих вилок 14 поєднана з одиничною штангою змінної довжини 8. Таким чином, узгоджена робота двох приводів 7 до зміни довжин одиничних штанг 8 забезпечує необхідний поворот кисті (захватного пристрою) 13 навколо осі руки 12, а також повороту цієї руки 12 відносно рухомої платформи 6 навколо осі поворотних шарнірів 10.

Використання поворотних шарнірів 10 та підшипника 11 дозволяє функціонально розмежувати приводи лінійних і кутових переміщень виконавчого органу робота, що помітно розширює діапазон цих переміщень та спрощує систему управління роботом в цілому.

2.2 Синтез приводу переміщення рухомої платформи

Задачами синтезу приводу переміщення рухомої платформи у даній роботі будуть визначення розмірів штанг постійної довжини та розташування напрямних переміщення повзунів приводів цих штанг. Для розв'язку першої задачі приймаємо, що кожу пару штанг постійної довжини приводу переміщення рухомої платформи ми замінюємо еквівалентною штангою. При цьому центри шарнірів даної розташовуватимуться посередині відрізків, що поєднують центри шарнірів реальних штанг, якщо приймати до уваги відстані між шарнірами на повзунах і на рухомій платформі. Таким чином, шарнірно поєднаний паралелограм замінюється еквівалентною штангою. За прийнятими трансформаціями довжина еквівалентної штанги буде рівною довжині реальної штанги. Під розташуванням напрямних ми будемо розуміти відрізок, що утворюється геометричним місцем центрів уявного шарніру кріплення еквівалентної штанги до повзуна, який переміщується по даній напрямній. Такий прийом дозволить нам уникнути розгляду впливу конкретної конструкції повзуна та напрямної на поставлену задачу синтезу.

При визначенні довжин еквівалентних штанг приводу переміщення рухомої платформи будемо прагнути забезпечити повну рухомість виконавчого органу робота у заданому просторі. За умовою задачі ми повинні забезпечити розташування розрахункової точки кисті (захватного пристрою) робота при будь-якому заданому положенні руки робота. Таку розрахункову точку розмістимо на осі руки робота на визначеній відстані від точки перетину осі поворотних шарнірів (позиція 10 на рис. 2.1) та осі обертання руки (позиція 12 на рис. 2.1) в підшипнику (позиція 11 на рис. 2.1). Цей конструктивний параметр буде входним у задачі синтезу приводу переміщення рухомої платформи.

В якості робочого простору, для якого ми повинні забезпечити повну рухомість виконавчого органу робота, приймаємо циліндр діаметром D і висотою H . У випадку паралельного розташування всіх напрямних, який саме

розглядається у нашій задачі, на таке розташування напрямних і на розміри еквівалентних штанг постійної довжини у приводі переміщення рухомої платформи безпосередньо впливатиме тільки діаметр робочого простору. Висота робочого простору матиме безпосередній вплив тільки на довжину напрямних.

Наявність повороту руки робота навколо осі поворотних шарнірів очевидно призведе до різного діапазону переміщень центрів шарнірів еквівалентних штанг на рухомій платформі, а відтак і довжини самих еквівалентних штанг. За довжину еквівалентної штанги ми приймаємо відстань між центрами шарнірів кріплення даної штанги. Спочатку визначимо довжину еквівалентної штанги, що поєднує повзун і рухому платформу в такому її положенні, коли через пряму розташування центрів шарніру кріплення еквівалентної штанги проходить площина повороту осі руки робота за умови її одночасного проходження через центральну вісь циліндру, що описує заданий робочий простір. Нехай це буде еквівалентна штанга 1. Схема до визначення довжини еквівалентної штанги 1 та розташування напрямної повзуна її переміщення представлена на рис. 2.2.

Вже згадану відстань від точки перетину осі поворотних шарнірів та осі обертання руки в підшипнику до розрахункової точки кисті (захватного пристрою) позначимо P . Водночас відстань від точки перетину осі поворотних шарнірів та осі обертання руки в підшипнику до центру шарніру кріплення еквівалентної штанги 1 на рухомій платформі у проекції на горизонтальну вісь схеми позначимо T .

Для запобігання виникненню надвисоких тисків у шарнірах еквівалентні штанги повинні утворювати у своїх крайніх положеннях певний кут β як до горизонтальної, так і до вертикальної осей на схемі. В такому випадку положення напрямної повзуна переміщення еквівалентної штанги 1 визначатиметься відрізком U_1 , що є проекцією довжини еквівалентної штанги L_{S1} на горизонтальну вісь схеми, при вертикальному розташуванні руки

робота у найближчому до згаданої напрямної розташуванні розрахункової точки кисті (захватного пристрою) робота у робочому просторі.

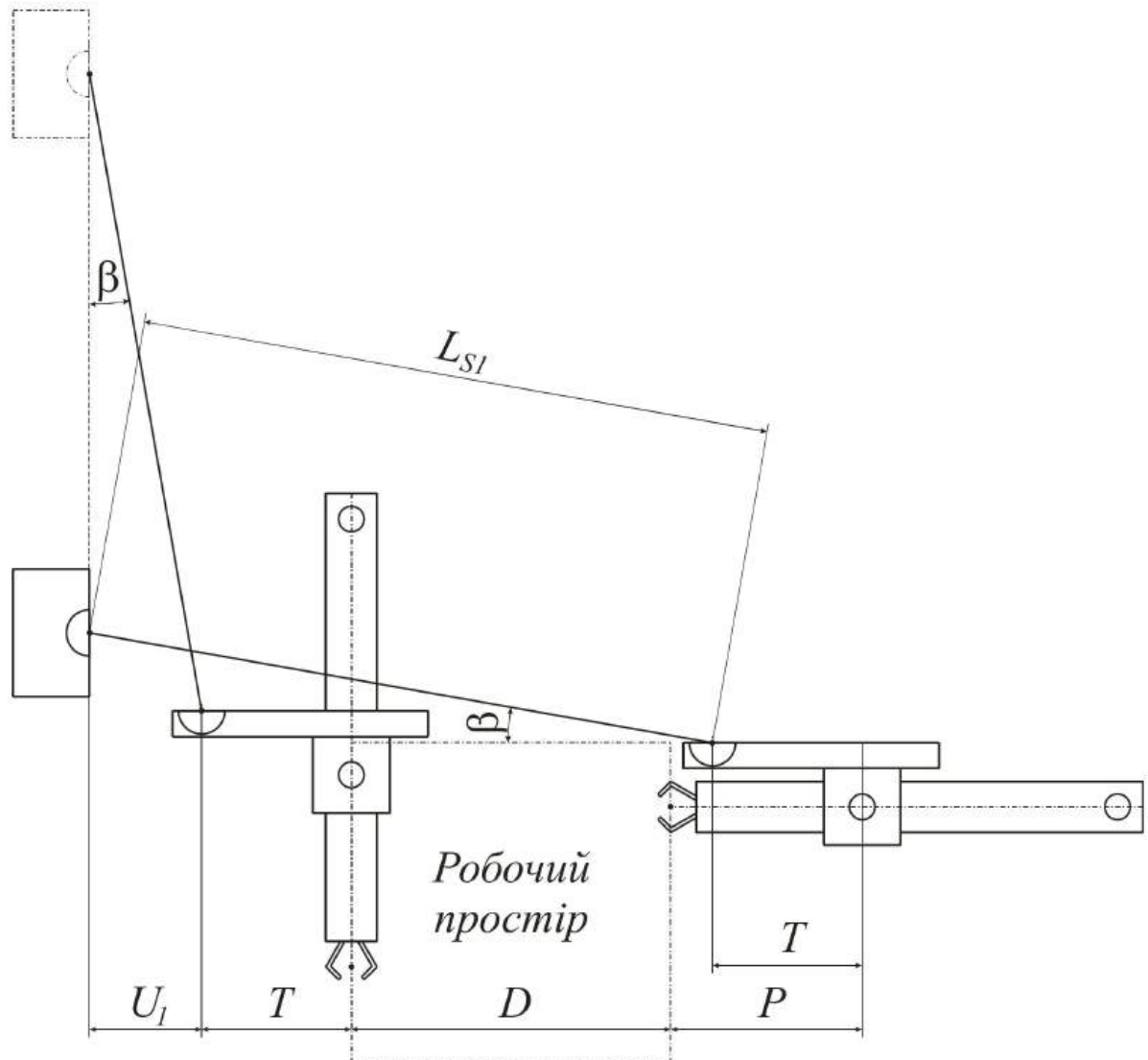


Рис. 2.2 – Схема до визначення довжини еквівалентної штанги 1

З наведених геометричних побудов можна записати, що

$$U_1 = L_{S1} \sin(\beta) .$$

Водночас при іншому крайньому розташуванні розрахункової точки кисті (захватного пристрою) робота у робочому просторі, що відповідатиме

найвіддаленішій її відстані до напрямної переміщення повзуна приводу еквівалентної штанги 1, можна записати таку залежність:

$$L_{S1} \cos(\beta) = U_1 + T + D + P - T,$$

або підставляючи значення U_1 з попереднього виразу:

$$L_{S1} \cos(\beta) = L_{S1} \sin(\beta) + D + P.$$

Перенесемо вирази, що містять L_{S1} у ліву частину рівняння та виділивши безпосередньо величину довжини еквівалентної штанги, послідовними перетвореннями знаходимо вираз для її розрахунку:

$$L_{S1} \cos(\beta) - L_{S1} \sin(\beta) = D + P,$$

$$L_{S1} (\cos(\beta) - \sin(\beta)) = D + P,$$

$$L_{S1} = \frac{D + P}{\cos(\beta) - \sin(\beta)}.$$

Знаючи довжину еквівалентної штанги, ми знайдемо і мінімально можливу координату розташування напрямної по попередньо встановленій залежності для U_1 .

Розташування інших двох еквівалентних штанг, що приєднуються до рухомої платформи, утворює симетричну картину. Тому достатньо буде встановити величину тільки однієї з штанг. Позначимо дані еквівалентні штанги індексами 2 і 3. Для встановлення необхідних геометричних залежностей розглянемо схему всього механізму у горизонтальній площині, як це зображено на рис. 2.3.

Приймаємо, що відстань між центром шарніру кріплення еквівалентної штанги 2(3) та площиною коливання руки внаслідок її повороту навколо осі поворотних шарнірів становить R . Відстань від центру шарніру кріплення еквівалентної штанги 2(3) до осі поворотних шарнірів у проекції на горизонтальну площину всього механізму позначимо C .

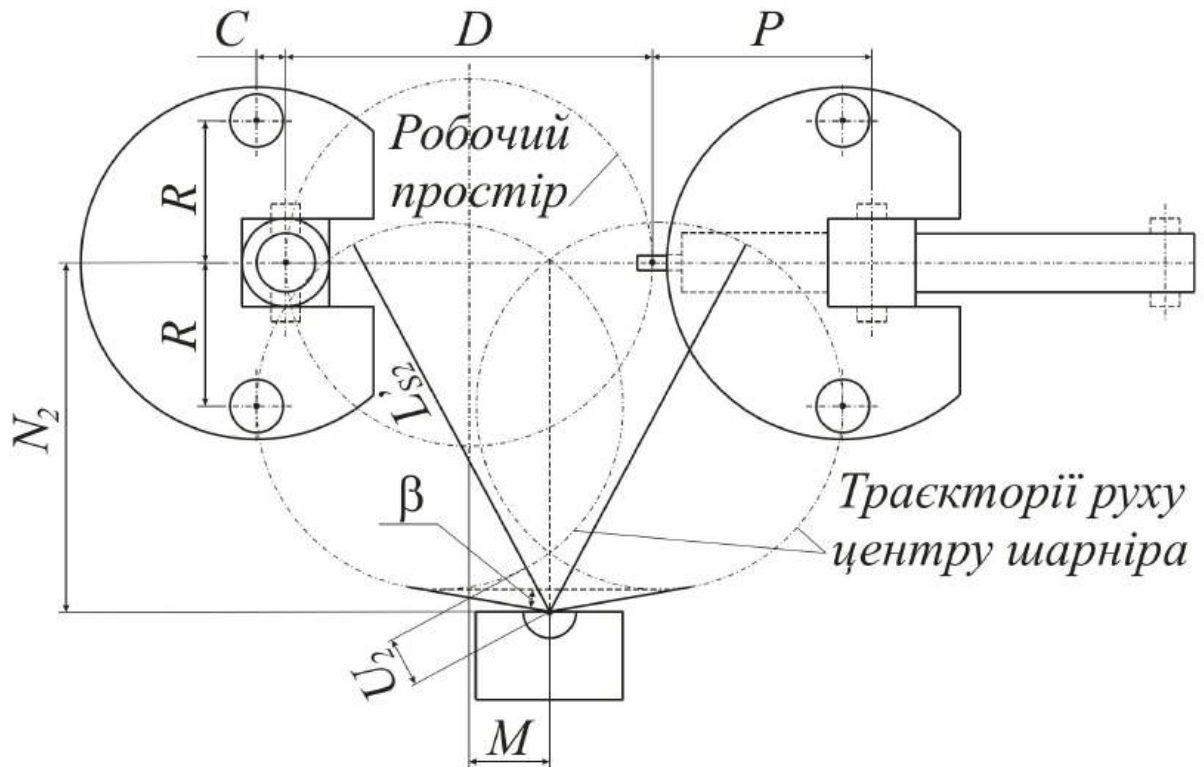


Рис. 2.3 – Схема до визначення довжини еквівалентної штанги 2(3)

Довжина еквівалентної штанги на рис. 2.3 позначена як L'_{s2} , оскільки в даному випадку зображено її проекцію на горизонтальну площину всього механізму. Координати розташування напрямної повзуна переміщення еквівалентної штанги 2 позначимо відносно центру робочого простору як відстані M і N_2 . При їх визначенні будемо намагатися досягнути мінімальної довжини еквівалентної штанги 2(3).

Центр шарніру кріплення еквівалентної штанги 2 до рухомої платформи при русі останньої по крайній траєкторії робочого простору за двох крайніх положеннях руки робота описуватиме два кола діаметром D , що

видно із схеми на рис. 2.3. Як видно з геометричних побудов, для мінімізації довжини еквівалентної штанги 2 напрямна повзуна її переміщення повинна розташовуватися на прямій, що проходить через точки перетину цих двох кіл. В такому відрізок M визначається простою залежністю

$$M = \frac{P}{2} - C.$$

Координата N_2 визначатиметься з урахуванням забезпечення мінімального кута β при розташуванні еквівалентної штанги 2(3) по дотичній до кожного з двох кіл траєкторії руху центру шарніру кріплення даної штанги до рухомої платформи. Величина проекції еквівалентної штанги 2(3) на горизонтальну площину механізму для нас в такому випадку інтересу не представляє. Згідно геометричних побудов за схемою на рис. 2.3, координата N_2 дорівнює:

$$N_2 = R + \frac{D}{2} \cos(\beta) + \left(\frac{P}{2} + \frac{D}{2} \sin(\beta) \right) \tan(\beta).$$

Визначення довжини еквівалентної штанги 2(3) будемо проводити аналогічно до схеми на рис. 2.2, з урахуванням тієї обставини, що координати розташування напрямної повзуна переміщення штанги в такому випадку нам будуть вже відомі. Величина U_2 відтак визначатиметься як різниця між проекцією еквівалентної штанги 2(3) на горизонтальну площину механізму та діаметром D робочого простору. Щодо довжини еквівалентної штанги 2(3), то її проекція L'_{s2} рівна

$$L'_{s2} = \sqrt{\left(\frac{D}{2} \cos(\beta) + \left(\frac{P}{2} + \frac{D}{2} \sin(\beta) \right) \tan(\beta) \right)^2 + \frac{P^2}{4} + \frac{D}{2}}.$$

З урахуванням кута β довжина еквівалентної штанги 2(3) відповідно становитиме

$$L_{s2} = \frac{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\cos(\beta) + \left(\frac{P}{2} + \frac{D}{2}\sin(\beta)\right)\tan(\beta)\right)^2 + \frac{P^2}{4} + \frac{D}{2}}}{\cos(\beta)}.$$

При цьому для еквівалентної штанги 2(3) важливо перевірити виконання умови

$$\sqrt{\left(\frac{D}{2}\cos(\beta) + \left(\frac{P}{2} + \frac{D}{2}\sin(\beta)\right)\tan(\beta)\right)^2 + \frac{P^2}{4} - \frac{D}{2}} > L_{s2} \sin(\beta).$$

Якщо дана умова виконується, то величину еквівалентної штанги 2(3) приймаємо такою, як розрахована за попереднім виразом. У випадку, коли поставлена умова не виконується, для розрахунку довжини даної штанги використовують вираз

$$L_{s2} \cos(\beta) = L_{s2} \sin(\beta) + D.$$

Шляхом послідовних перетворень розраховуємо інший вираз для розрахунку довжини еквівалентної штанги 2(3):

$$L_{s2} \cos(\beta) - L_{s2} \sin(\beta) = D,$$

$$L_{s2} = \frac{D}{\cos(\beta) - \sin(\beta)}.$$

Враховуючи збільшення довжини еквівалентної штанги 2(3), координата N_2 розташування напрямної повзуна 2(3) визначатиметься за іншою залежністю:

$$N_2 = R + \sqrt{\left(\frac{D \cos(\beta)}{\cos(\beta) - \sin(\beta)} - \frac{D}{2}\right)^2 - \frac{P^2}{4}}.$$

Залежності для розрахунку довжини еквівалентної штанги 3 та координат розташування напрямної повзуна приводу зазначеної штанги будуть аналогічними, що походить із симетричності механізму. Відтак вважаємо задачу синтезу приводу переміщення рухомої платформи виконаною.

2.3 Синтез приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою)

Метою даного етапу синтезу запропонованої конструкції робота є визначення залежностей для розрахунку довжин штанг і координат розташування центру шарніру кріплення приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) на базисній деталі робота в залежності від конструктивних розмірів вузла кріплення штанг змінної довжини даного приводу до руки робота. За результатами вирішення цієї задачі синтезу повинні бути забезпечені задані кути повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) при знаходженні розрахункової точки останньої в довільному положенні в обраному робочому просторі. Приймаємо, що рука робота може довільно змінюватися своє кутове положення відносно рухомої платформи механізму в межах від горизонтального її положення до вертикального. Кисть (захватний пристрій) повинна обертатися на кут 90

градусів. Початкова орієнтація кисті (захватного пристрою) на руці робота не задається.

Штанги змінної довжини приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) позначимо індексами 4 і 5. Приймаємо симетричну побудову даного механізму, внаслідок чого буде достатньо визначити зміну довжини штанг і координат розташування центру шарніру кріплення приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) на базисній деталі робота тільки для одного приводу. Для іншого викладки будуть аналогічними. В математичних операціях будемо розглядати, наприклад, штангу змінної довжини 4. Розглянемо схему на рис. 2.4.

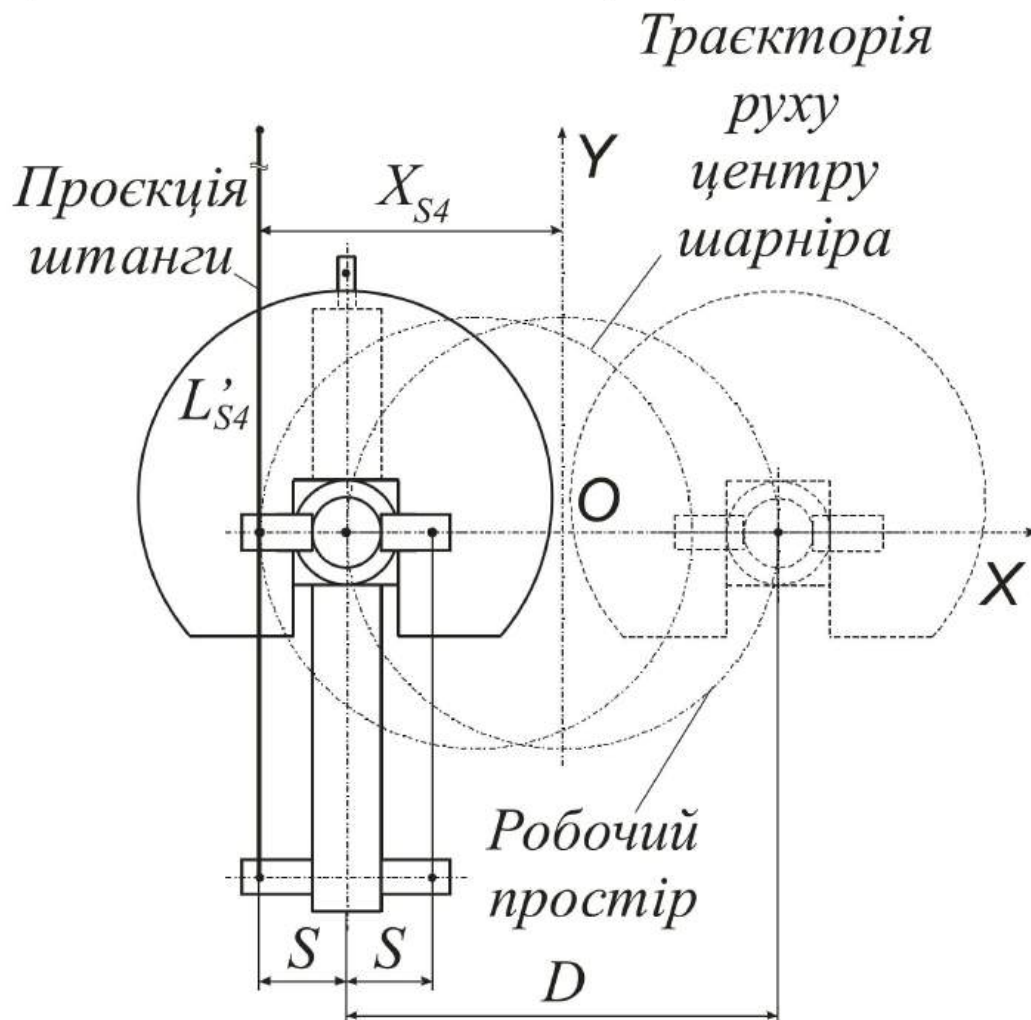


Рис. 2.4 – Схема до визначення координати розташування центру шарніру кріплення приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою)

В якості координати кріплення центру шарніру приводу штанги змінної довжини на базисній деталі робота приймемо таке положення згаданої штанги, за якої її проєкція на площину основи робота буде паралельною осі Y . В такому випадку на даний параметр впливає прийнятий діаметр робочого простору D та віддалення точки кріплення шарніру штанги змінної довжини до вилки руки робота S . З геометричних побудов маємо:

$$X_{s4} = \frac{D}{2} + S.$$

Для визначення двох інших координат кріплення центру шарніру приводу штанги змінної довжини на базисній деталі робота розглянемо схему на рис. 2.5. Дану задачу потрібно розглядати в комплексі з визначенням довжини штанги зазначеного приводу. Дана задача матиме три невідомих величини: довжина штанги і дві координати розташування шарніру, тому необхідно скласти три рівняння. Спочатку складемо рівняння геометричних залежностей для такого положення руки робота та його кисті (захватного пристрою), за якого довжина штанги приводу повороту та орієнтації даних елементів маніпулятора буде мінімальною. Позначимо її L_{s4} . На схемі з рис. 2.5 такі умови виконуються за умови вертикального розташування руки робота та такого розташування вилки механізму орієнтації кисті (захватного пристрою), при якому його розрахункова точка максимально віддалена від робочого простору. Відмітимо, що з достатньою для наших цілей точністю можна вважати, що на рисунку 2.5 в описаному мінімальному положенні штанга відображається в натуральну величину. З геометричних побудов маємо:

$$L_{s4}^2 = (W - P - V)^2 + \left(C - \frac{D}{2} - S \cos(\varphi) \right)^2,$$

де φ – кут орієнтації кисті (захватного пристрою).

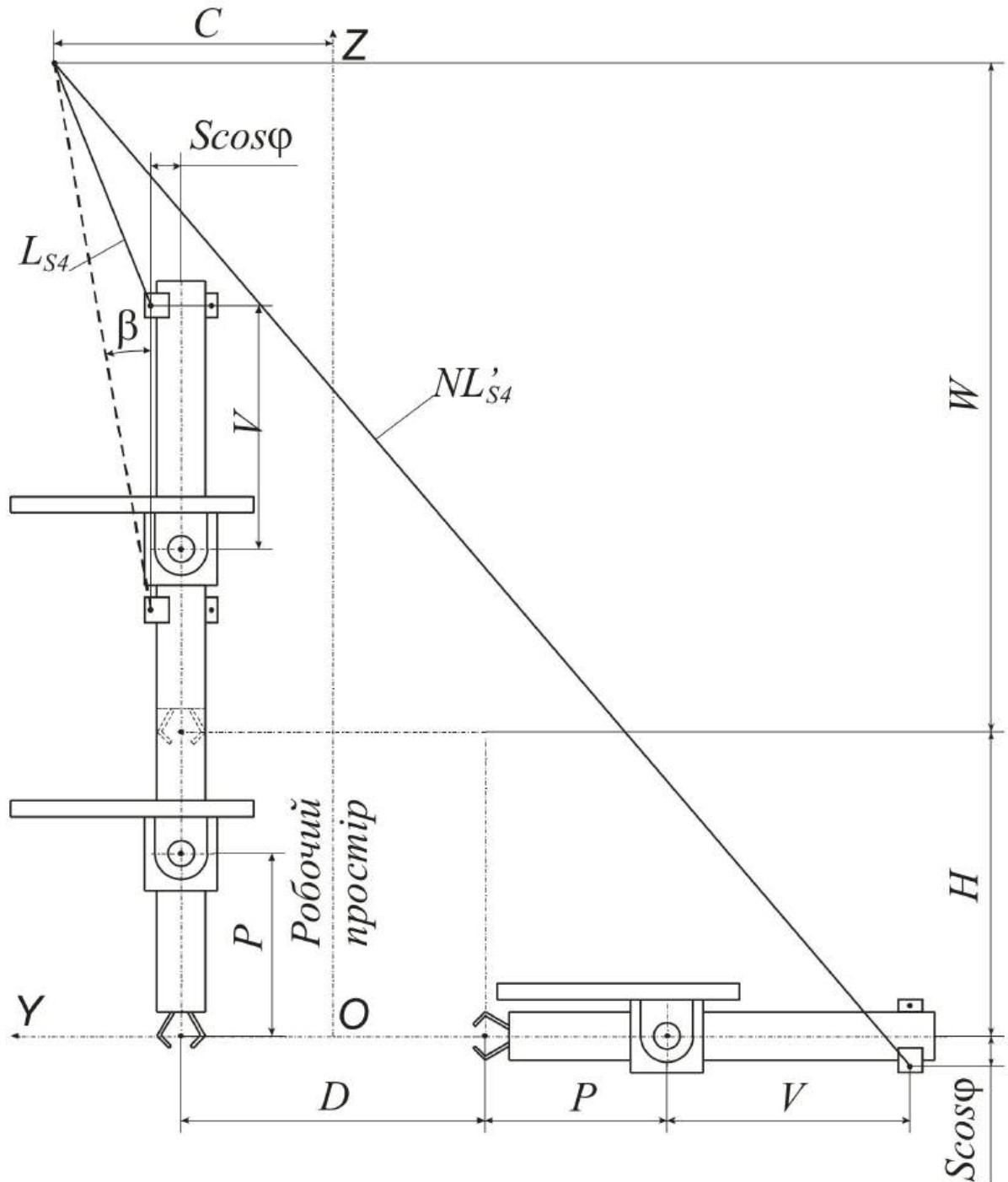


Рис. 2.5 – Схема до визначення координати розташування центру шарніру кріплення приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) і довжин штанги приводу

Максимальну довжину штанги приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) виразимо через коефіцієнт зміни даної довжини, який позначимо N . Максимальна довжина згаданої штанги відповідає найнижчому горизонтальному положенню руки робота на схемі з рис. 2.5, за якого розрахункова точка кисті (захватного пристрою) буде розташовуватися на периферії робочого простору. Вилка механізму орієнтації кисті (захватного пристрою) також розглядається в найнижчому можливому положенні. Також необхідно враховувати віддаленість даної точки в напрямку, перпендикулярному до площини на рис. 2.5. Наближено приймаємо цю величину рівною X_{S4} . З геометричних побудов маємо:

$$N^2 L_{S4}^2 = (W + H + S \cos(\varphi))^2 + \left(C + \frac{D}{2} + P + V\right)^2 + \left(\frac{D}{2} + S\right)^2.$$

Третє необхідне рівняння в даній системі знаходимо з умови забезпечення кута крайнього положення штанги δ за аналогією з схемою на рис. 2.2. Своєї граничної величини даний кут досягає, коли рука робота має вертикальне найнижче розташування, при цьому розрахункова точка вилки механізму орієнтації кисті (захватного пристрою) максимально віддалена від робочого простору. З геометричних побудов маємо:

$$\tan(\beta) = \frac{C - \frac{D}{2} - S \cos(\varphi)}{W + H - P - V}.$$

Аналітичний розв'язок отриманої системи рівнянь можливий, проте виведення результату буде мати занадто громіздкий вигляд, оскільки на певному своєму етапі передбачає розв'язок повного рівняння четвертої степені. Для полегшення цієї задачі скористаємося спеціалізованим прикладним пакетом математичних обчислень Mathematica. Результат

наведено у додатку. З урахуванням певних особливостей роботи пакету Mathematica всі змінні представлені маленькими літерами, наприклад, $L \rightarrow l$, $C \rightarrow c$, $W \rightarrow w$ і так далі. Кут φ позначено f , кут β позначено b . З отриманих чотирьох комбінацій розв'язків геометричний сенс має та, що забезпечує отримання з додатнім знаком всіх трьох шуканих величин.

Для штанги 5 внаслідок симетричності механізму конструктивні залежності аналогічні. На даному етапі задачу синтезу приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) можна вважати розв'язаною.

Координата кріплення центру шарніру приводу зміни довжини штанги механізму повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) на базисній деталі робота вздовж осі Z дорівнює сумі $H + W$. Водночас максимальне віддалення крайньої точки повзуна від робочого простору, згідно схеми на рис. 2.6, визначається сумою $H + P + E + A + L_{S1}\cos(\beta)$. На даній схемі відрізком A позначено конструктивний параметр повзуна, що лімітує його габарит вздовж осі Z , а відрізком E – конструктивний параметр рухомої платформи, що визначає відстань від центру поворотного шарніру між рухомою платформою та підшипником обертання руки робота до центру шарніру кріплення еквівалентної штанги постійної довжини на рухомій платформі вздовж осі Z . Якщо поставити умову, що переміщення повзуна повинне бути в межах відрізка W , тобто

$$W > P + E + A + L_{S1}\cos(\beta),$$

то можна визначати додаткові межі зміни параметрів, які задовольнятимуть поставлену умову, обмежуючи, до прикладу, коефіцієнт зміни довжини штанги приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою), або забезпечуючи раціональну величину кута β .

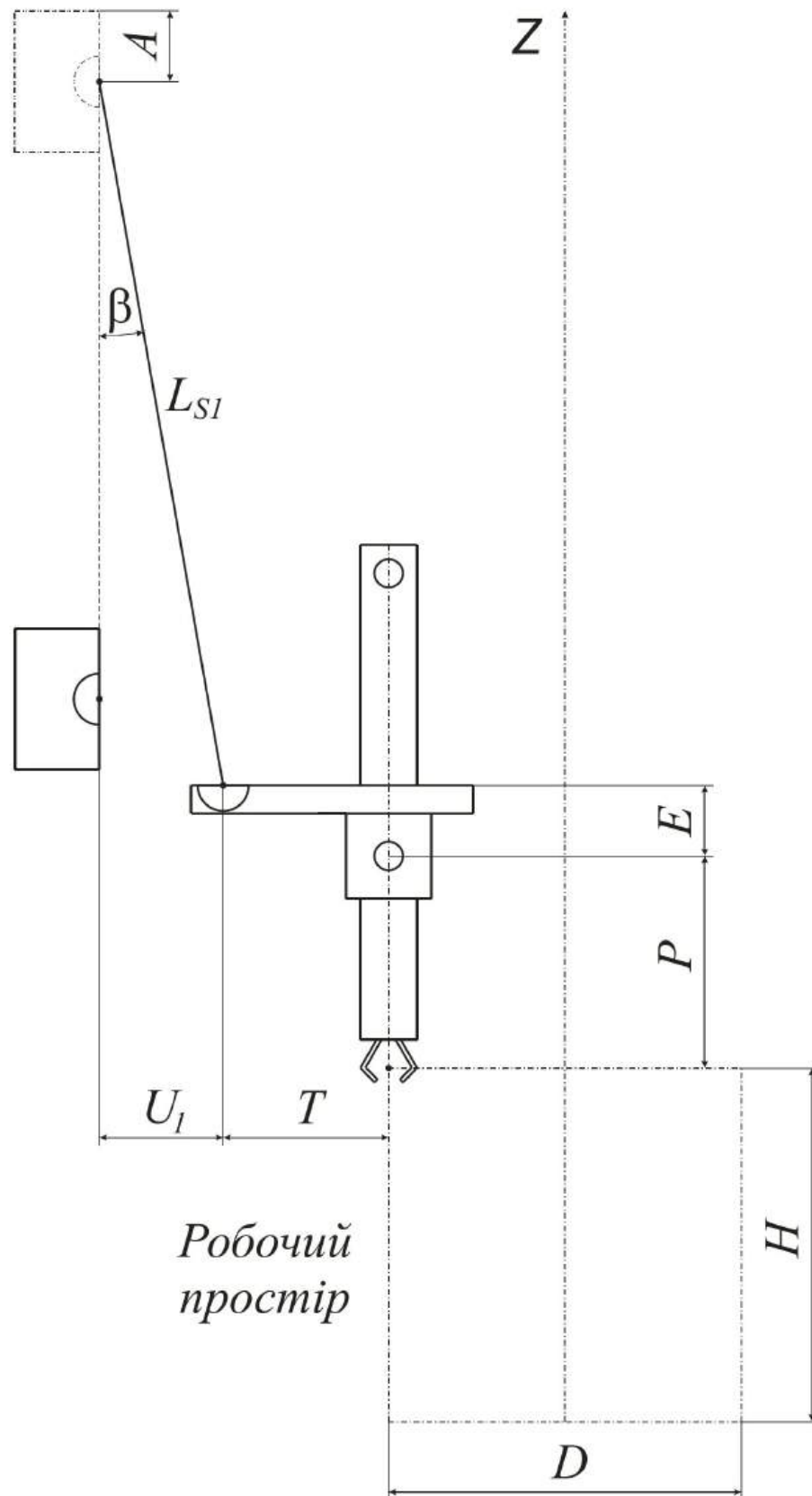


Рис. 2.6 – Схема визначення максимального віддалення повзуна

2.4 Дослідження конструктивних залежностей робота

Спочатку розв'яжемо задачу знаходження раціональної величини кута β за умови, що розміри переміщень та локацій вздовж осі Z для приводу лінійних переміщень рухомої платформи і приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) будуть однаковими. Для цього необхідно виконання наступної умови:

$$W = P + E + A + L_{SI} \cos(\beta),$$

або в більш розгорнутому вигляді:

$$W = P + E + A + \frac{(D + P)\cos(\beta)}{\cos(\beta) - \sin(\beta)}.$$

Для вирішення питання знаходження раціональної величини кута β побудуємо графіки залежності величини W та комбінації параметрів $P + E + A + \frac{(D + P)\cos(\beta)}{\cos(\beta) - \sin(\beta)}$ від цього кута. Дану задачу будемо розв'язувати при декількох значеннях коефіцієнта зміни довжини штанги приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою). Результат у вигляді графіків показано на рис. 2.7.

Безпосередньо точки перетину графіків відповідають наступним значенням кутів β :

- при $N = 1.9$ раціональне значення кута β становить приблизно 24° ,
- при $N = 1.7$ раціональне значення кута β становить приблизно 28° ,
- при $N = 1.5$ раціональне значення кута β становить приблизно 33° .

Отже, при зменшенні значення коефіцієнта зміни довжини штанги приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) значення кута β можна приймати більшими.

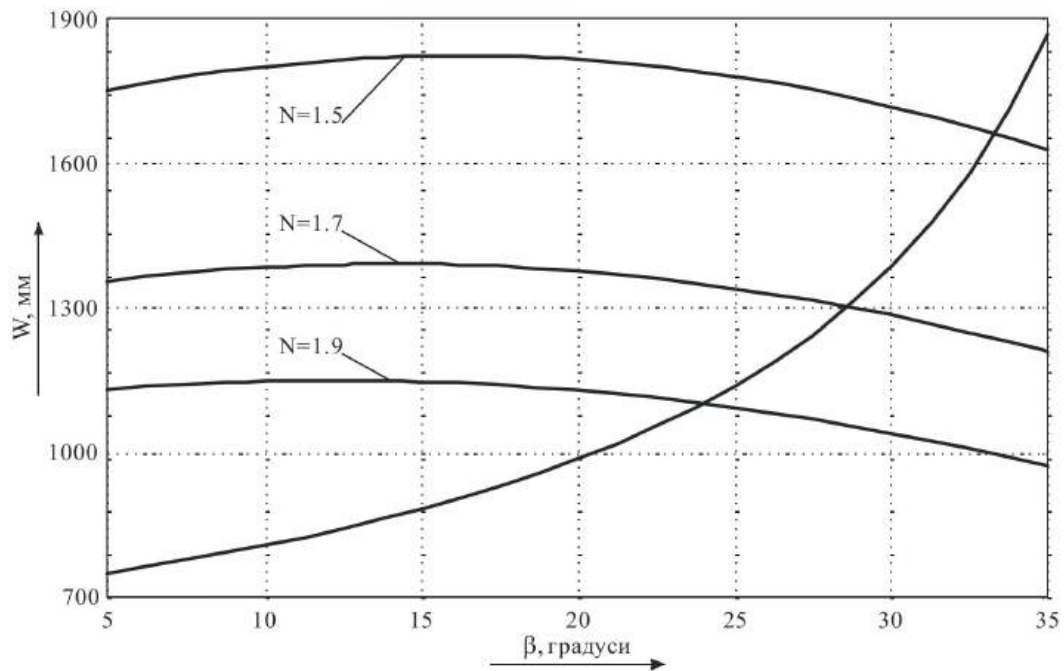


Рис. 2.7 – Графік залежності величини W від кута β

При цьому графіки залежності величини C та мінімальної довжини L штанги змінної довжини приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) від кута β показані на рис. 2.8 і 2.9 відповідно.

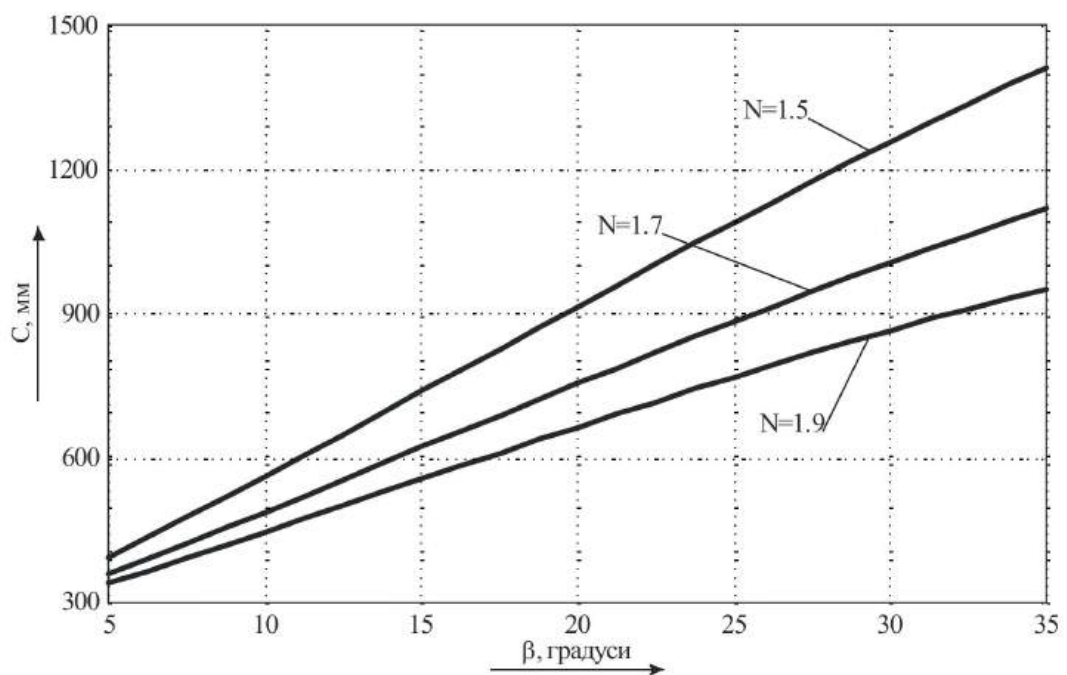


Рис. 2.8 – Графік залежності величини C від кута β

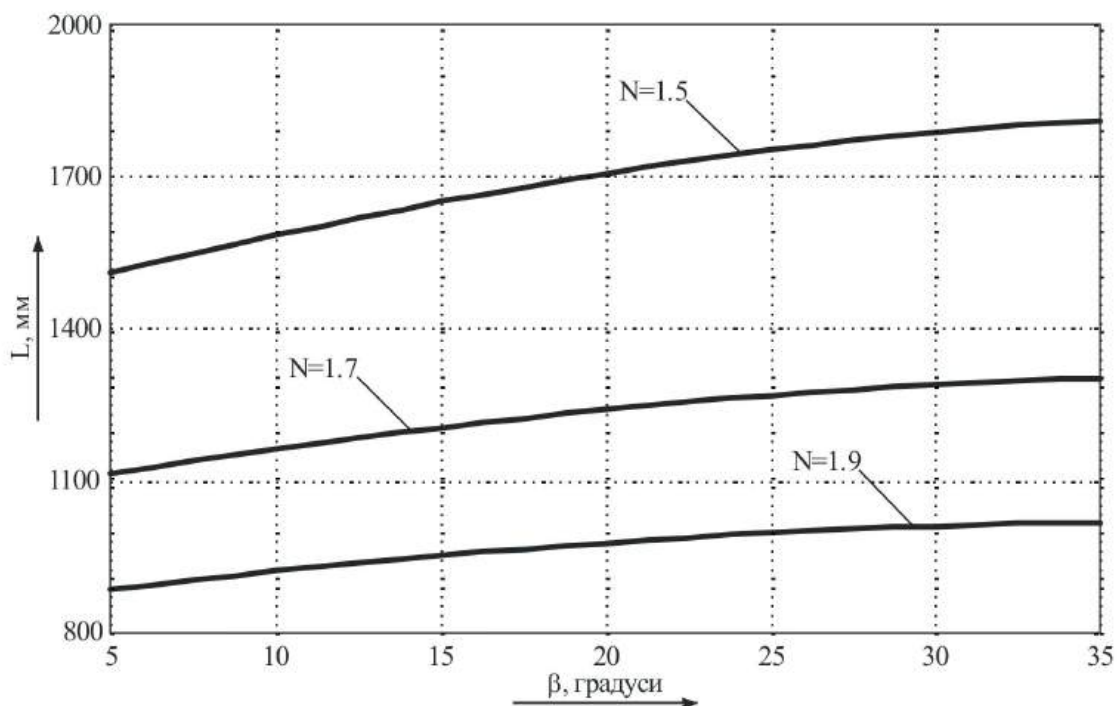


Рис. 2.9 – Графік залежності мінімальної довжини штанги L від кута β

На всіх графіках з рисунків 2.7 – 2.9 підтверджується тенденція, що при зростанні величини коефіцієнта зміни довжини штанги приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) механізм буде більш компактним. При цьому зростання величини кута β в дослідженому діапазоні призводитиме до зростання координати C (координата Y загальної системи координат) розташування центру шарніру кріплення механізму зміни довжини штанги приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) та самої згаданої довжини штанги в її мінімальному габариті. Тобто габарити робота будуть більшими. Однак для величини W в дослідженому діапазоні зміни кута β існує максимум, і при більших значеннях даного кута механізм вздовж осі Z буде більш компактним.

Варто зазначити, що для повноти картини уявлень про залежності приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) варто дослідити зміну довжини штанги даного приводу в її максимальному габариті. Даний графік показаний на рис. 2.10.

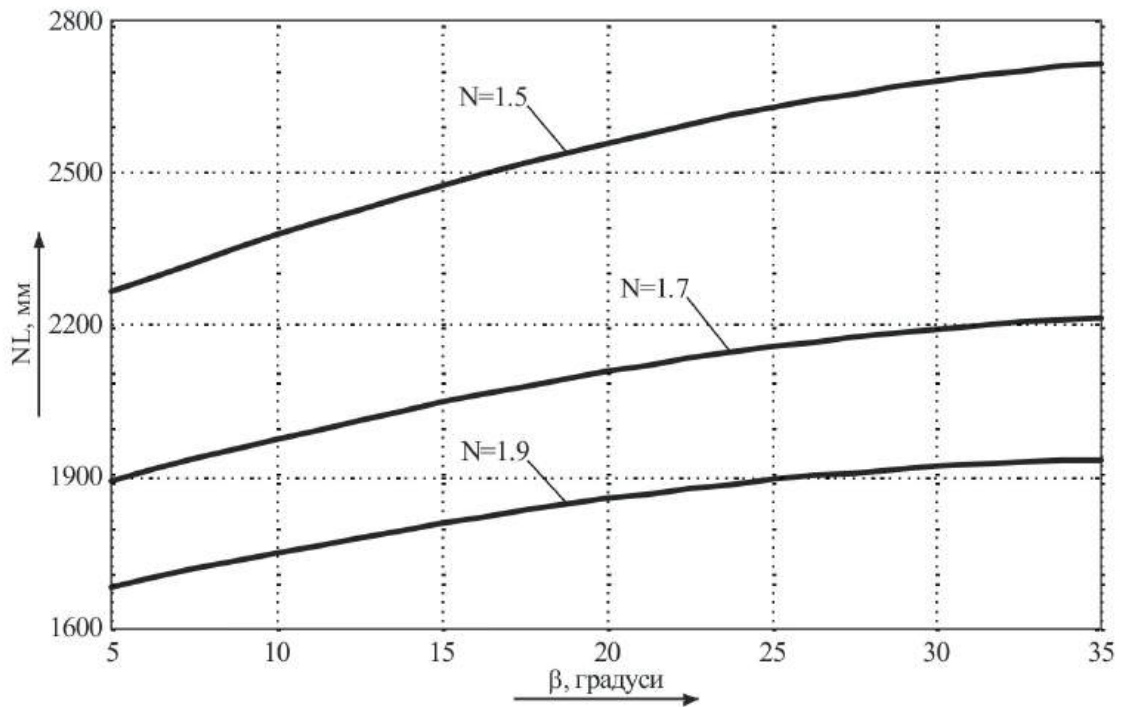


Рис. 2.10 – Графік залежності максимальної довжини штанги L (добуток NL) від кута β

Тенденції залежностей довжини штанги приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) в обох її габаритах від зміни кута β є однаковими, з тією різницею, що для максимального подовження згаданої штанги графіки мають більш різке зростання.

На наступному етапі досліджень проаналізуємо вплив на конструктивні параметри приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) діаметра робочого простору. Графіки відповідних залежностей наведені на рис. 2.11 – 2.13. Всі залежності розраховані для одного значення коефіцієнта зміни довжини штанги $N = 1.9$.

Як видно з продемонстрованих графіків, залежності мають майже пропорційно зростаючий характер. Проте прямої пропорційної немає. Зростання діаметру робочого простору в 3 рази призводить до зростання параметру W в 1,21 рази, параметру C в 1,95 рази, мінімальної довжини штанги L в 1,28 рази.

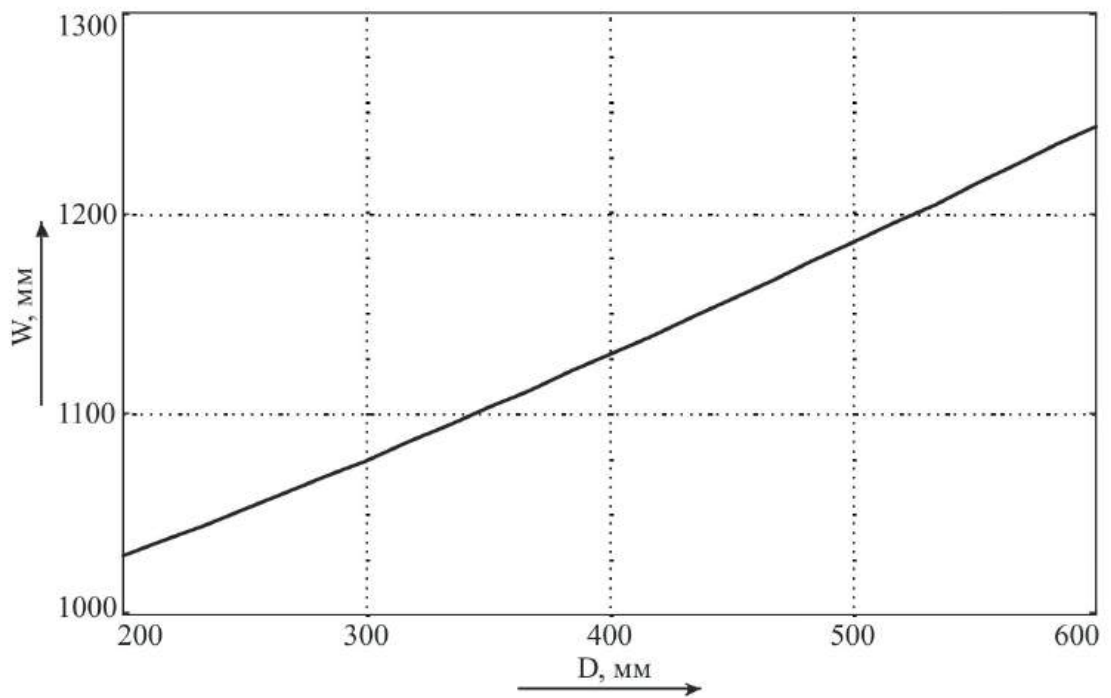


Рис. 2.11 – Графік залежності величини W від діаметра робочого простору D

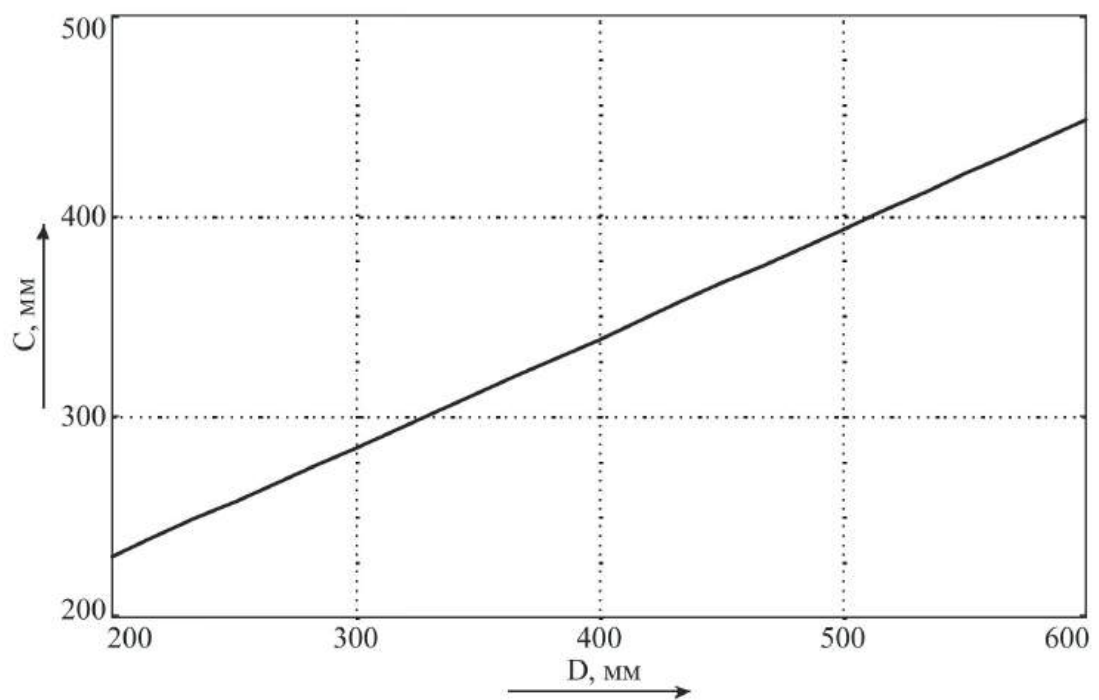


Рис. 2.12 – Графік залежності величини C від діаметра робочого простору D

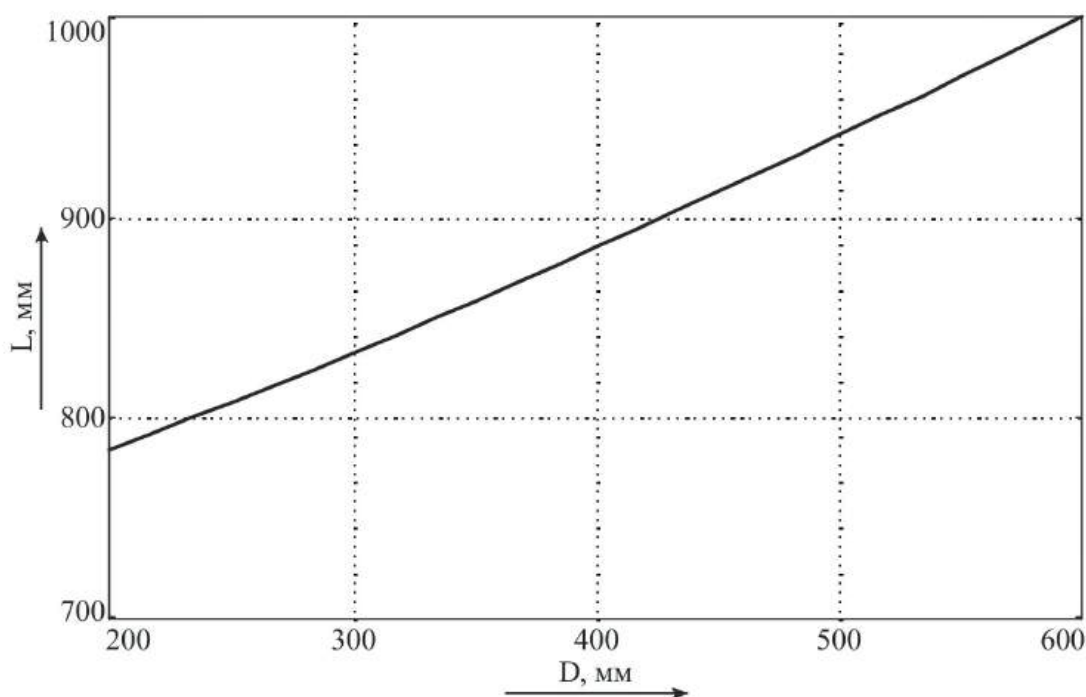


Рис. 2.13 – Графік залежності мінімальної довжини штанги L від діаметра робочого простору D

Для забезпечення повноти картини впливу розмірів робочого простору на конструктивні параметри приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) проаналізуємо залежність останніх від висоти робочого простору H. Результати розрахунків у вигляді графіків показані на рис. 2.14 – 2.16.

Як видно з продемонстрованих графіків, аналогічно попередньому випадку всі залежності мають майже пропорційно зростаючий характер. Проте прямої пропорційної немає. Зростання висоти робочого простору в 3 рази призводить до зростання параметру W в 1,27 раз, параметру C в 1,16 раз, мінімальної довжини штанги L в 1,36 раз. Збільшення розмірів робочого простору вздовж осі Z (висота H) очікувано призвело до зростання параметру W та меншого впливу на параметр C, в той час як збільшення розмірів робочого простору в площині, що перпендикулярна до осі Z (діаметр D), призвело до превалюючого зростання параметру C.

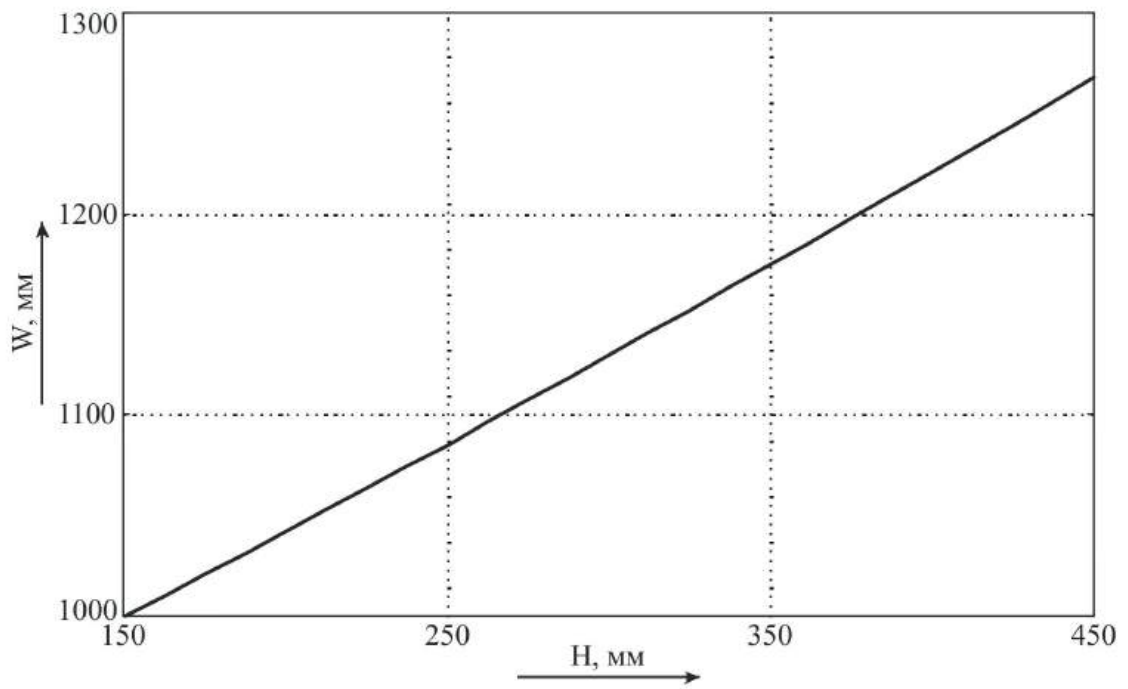


Рис. 2.14 – Графік залежності величини W від висоти робочого простору H

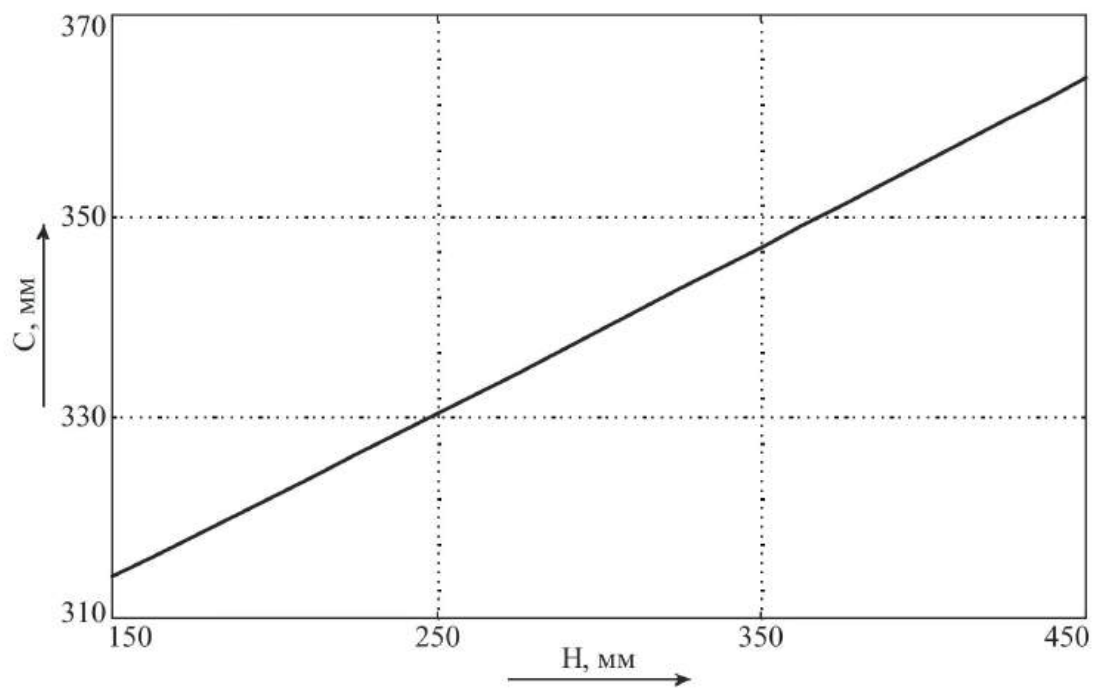


Рис. 2.15 – Графік залежності величини C від висоти робочого простору H

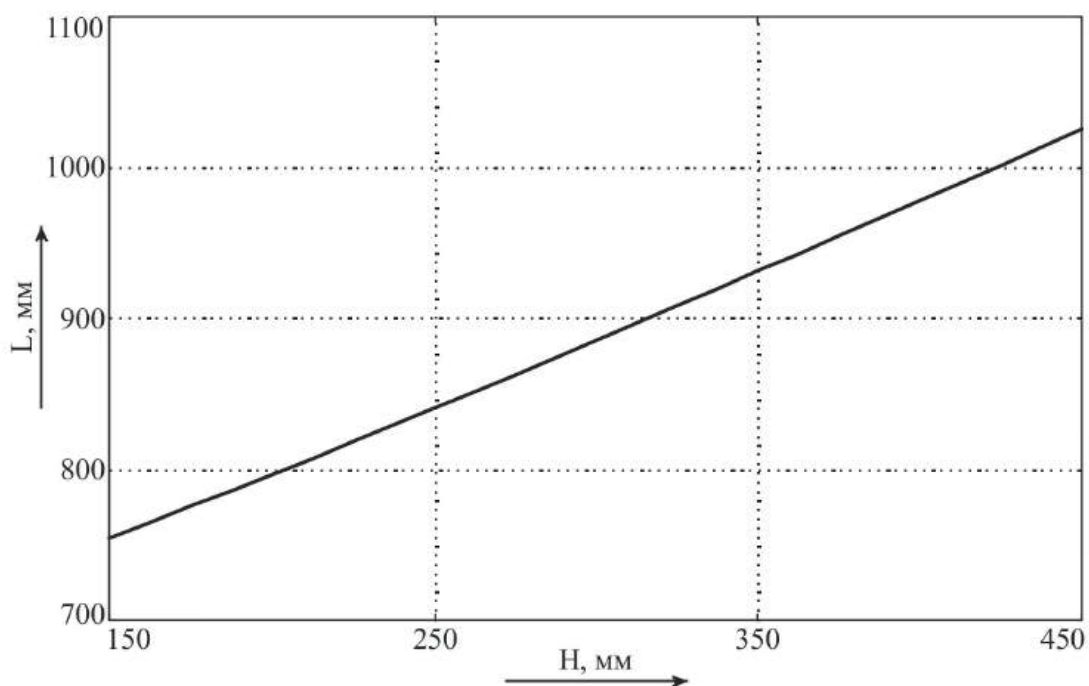


Рис. 2.16 – Графік залежності мінімальної довжини штанги L від висоти робочого простору H

В цілому можна зазначити, що вплив діаметру робочого простору на конструктивні параметри приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою), виявився більшим, ніж вплив на них висоти робочого простору. Це пояснюється тим, що діаметр робочого простору відкладається по двом координатам системи відліку, в той час як висота робочого простору відкладається по одній координаті прийнятої системи відліку.

Дослідження конструктивних параметрів приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) у даній роботі завершимо аналізом впливу кута орієнтації захвату. Для забезпечення повороту об'єкту маніпулювання з горизонтального у вертикальне положення і навпаки достатньо, щоб кисть робота оберталася на 90 градусів. Проте важливо знати загальний вплив діапазону зміни кута φ на параметри приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою), оскільки забезпечення необхідної рухомості руки робота в довільній точці робочого простору є однією з умов поставленої задачі дослідження. Результати розрахунків у вигляді графіків продемонстровано на рис. 2.17 – 2.19.

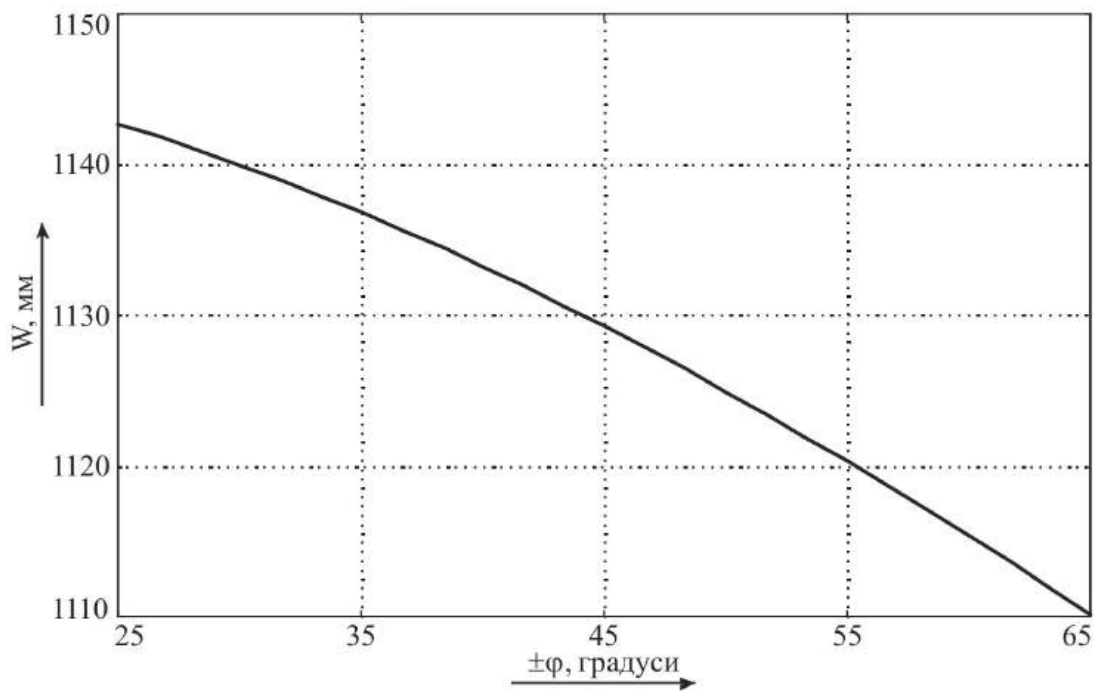


Рис. 2.17 – Графік залежності величини W від діапазону зміни кута $\pm\varphi$

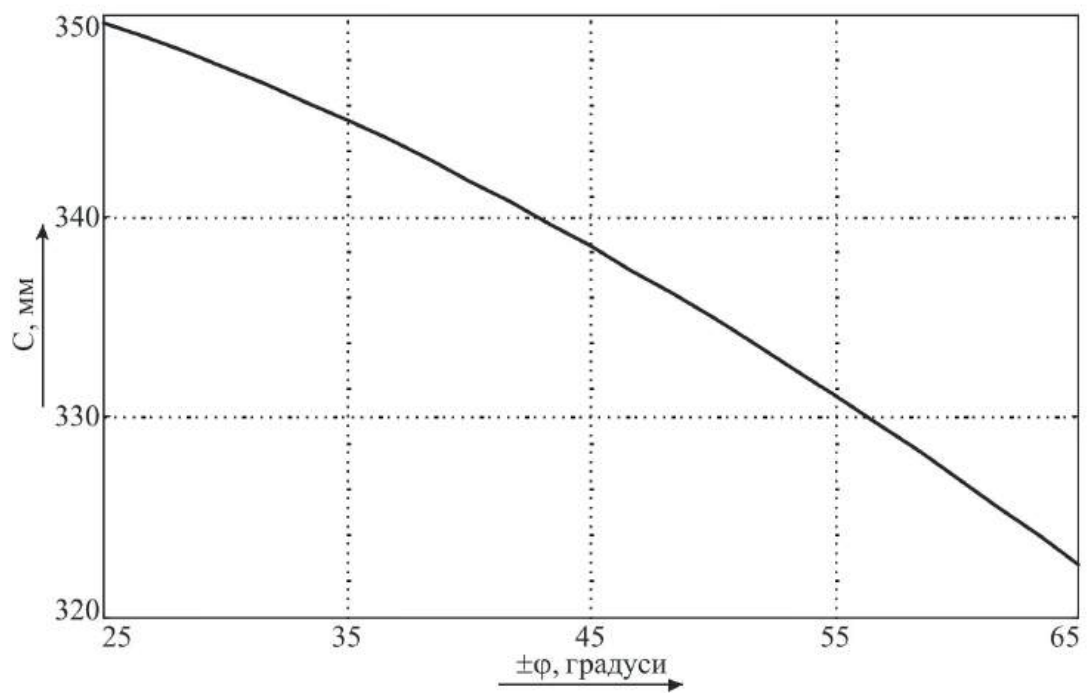


Рис. 2.18 – Графік залежності величини C від діапазону зміни кута $\pm\varphi$

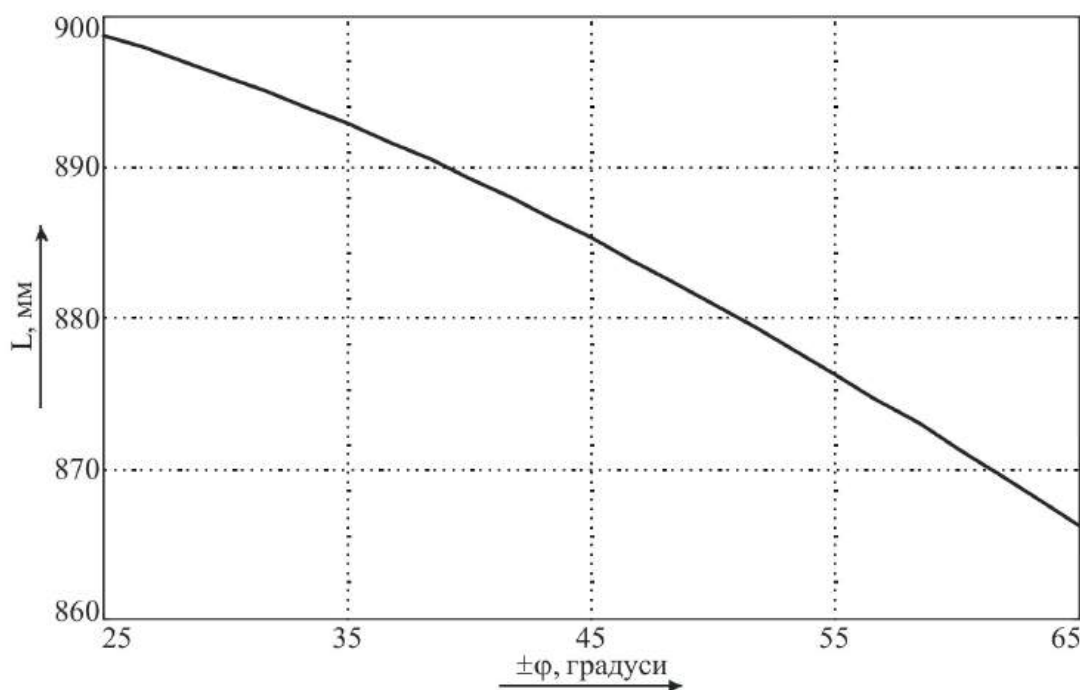


Рис. 2.19 – Графік залежності мінімальної довжини штанги L від діапазону зміни кута $\pm\varphi$

Характер залежностей на рисунках 2.17 – 2.19 має повільно спадаючий характер. Зростання діапазону зміни кута повороту кисті (захватного пристрою) з $\pm 25^\circ$ до $\pm 65^\circ$ призводить до зменшення параметру W в 1,03 рази, параметру C в 1,08 раз, мінімальної довжини штанги L в 1,04 рази. Такий незначний вплив пояснюється невеликою зміною конструктивних параметрів, закладених в математичну модель, при повороті кисті (захватного пристрою) у порівнянні з іншими такими параметрами. Максимальний діапазон зміни кута φ обмежений особливими положеннями штанг змінної довжини приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою).

Розроблена математична модель може бути покладена в основу методики проектування даного механізму. Максимальний вплив на конструктивні параметри приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою) має коефіцієнт зміни довжини штанги даного приводу. В даній роботі проаналізовано тільки такі випадки, коли

конструкція механізму зміни довжини штанги забезпечує її збільшення до 2 раз, наприклад для конструкцій, в яких гвинт вкрито в трубу кінцевої довжини, а до самої труби прикріплена гайка. Можливі телескопічні конструкції подібних труб чи варіанти, коли гайка є частиною шарніру, що кріпиться на базисній деталі робота, забезпечують більший діапазон зміни довжини штанг. В такому випадку необхідно аналізувати спроможність приводу лінійних переміщень рухомої платформи забезпечувати рух на визначену висоту робочого простору Н. Такий приклад реалізовано в даній роботі і результати якого продемонстровано на рисунках 2.7 – 2.9.

РОЗДІЛ 3

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЄКТУ

П'ЯТИКООРДИНАТНОГО РОБОТА

3.1 Загальні вихідні дані

Проектний робот являє собою універсальну машину, яка може використовуватися як для здійснення механічної обробки деталей основним інструментом, так і для переміщення деталей і заготовок, шляхом заміни одного вузла.

Для даного робота важко підібрати прямі аналоги, тому для розрахунку показників економічної ефективності проєкту у якості бази для порівняння обираємо дві технологічні машини, одна з яких може виконувати лише операції механічної обробки, а інша – операції переміщення деталей. Прийmemo, що продуктивність виконання відповідних операцій у порівнюваних варіантах – однакова. Проте штучний час виконання операцій проєктним роботом в сумі враховує також заміну робочого органу (руку на шпиндель і навпаки) та переналаштування програмного забезпечення (ПЗ) при переході на інший режим роботи. Очікується, що використання проєктного робота дозволить знизити капітальні вкладення споживача за рахунок заміни двох вузькоспеціалізованих технологічних машин на одну універсальну, а також скоротити втрати, пов'язані з простоюваннями вузькоспеціалізованих машин за відсутності виробничої потреби у виконанні відповідних операцій.

Загальні техніко-економічні показники базових та проєктного роботів зведено до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Загальні вихідні техніко-економічні показники

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			Базовий	Проект
1	2	3	4	5

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5
1.	Річна програма випуску продукції	шт./рік	10000	10000
2.	Потреба у роботах-маніпуляторах	шт./рік	2	1
3.	Штучний час виконання операцій:			
	- механічної обробки	хв.	0,22	0,22
	- транспортування	хв.	0,04	0,04
	- заміна робочого органу та ПЗ	хв.	-	0,31
4.	Потужність електродвигунів	кВт	0,7	0,75
5.	Площа, яку займає робот	м ²	1,6	2,0
6.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частини	УРО	7/18	8/20
7.	Оптова ціна робота	грн.	157200	-

3.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

Проектний робот-маніпулятор розроблюється на прототипу, в процесі трансформації якого замінюється конструкція модуля при збереженні платформи.

3.2.1 Витрати на проектування робота визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сг.к} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_v, \quad (3.1)$$

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції модуля, шт.;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сг.к}$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

κ_{∂} – додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c – відрахування на соціальні потреби від заробітної плати конструкторів, %;

H_v – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$B_{\text{нк}} = 1 \cdot 19 \cdot 102,27 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 19 \cdot 102,27 \cdot \frac{45}{100} = 3481,94 \text{ грн.}$$

3.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва роботи:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{mex} \cdot Z_{cz.m} \cdot \left(1 + \frac{K_d}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_v, \quad (3.2)$$

де T_{mex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{cz.m}$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_r = 1 \cdot 21 \cdot 98,75 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 21 \cdot 98,75 \cdot \frac{55}{100} = 3923,61 \text{ грн.}$$

3.3 Визначення повної собівартості та оптової ціни проектного робота

Після визначення трудомісткості виготовлення проектного робота розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{r_i} \cdot T_i, \quad (3.3)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

$C_{\text{г}}$ – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i -й вид робіт з урахуванням умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$Z_{\text{ор}} = 2,3 \cdot 92,015 = 211,63 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_o = \sum_{i=1}^n Z_{\text{ор}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{пп}_i}}{100}, \quad (3.4)$$

де $\Pi_{\text{пп}_i}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Так, витрати на утримання та експлуатацію обладнання на механічних роботах:

в) цехові витрати:

$$B_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^n Z_{\text{ор}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{цп}_i}}{100}, \quad (3.5)$$

де $\Pi_{\text{цп}}$ – процент цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_o = 211,63 \cdot \frac{320}{100} = 677,23 \text{ грн;}$$

$$B_{\text{цех}} = 211,63 \cdot \frac{240}{100} = 507,92 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат, які включені до собівартості модернізації робота

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $Z_{\text{ор}}$, грн	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн		Загальноцехові витрати $K_{\text{цех}}$, грн	
					%	грн.	%	грн.
Ливарні	1,3	3	102,715	133,54	350	467,38	242	323,16
Механічні	2,3	4	92,015	211,63	320	677,23	240	507,92
Слюсарсько- складальні	8,5	4	92,015	782,17	210	1642,56	220	1720,77
Інші	5,8	3	82,813	480,32	220	1056,69	140	672,44
Всього	17,9	—	—	1607,66	—	3843,86	—	3224,30

Повну собівартість модернізації робота розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базової конструкції. Розрахунок виконуємо за формулою:

$$C_{\text{пов.мод}} = M_o + M_d + P_n + B_n + T_v - B_{\text{зв}} + E_{\text{тех}} + P_{\text{тех}} + \\ + Z_{\text{ор}} + Z_{\text{др}} + B_{\text{сс}} + Z_{\text{шт}} + B_o + B_{\text{цех}} + B_{\text{зав}} + B_{\text{ін}}, \quad (3.6)$$

де M_o, M_d – відповідно витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

P_n – покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств, грн.;

Розрахунок витрат на основні матеріали та покупні комплектуючі вироби зведено до табл. 3.3.

T_v – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

B_n – напівфабрикати власного виробництва, грн.;

B_{zv} – зворотні відходи, які реалізуються (віднімаються), грн.;

E_{tex}, P_{tex} – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

$Z_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

B_{cc} – відрахування в фонд соціального страхування, грн.;

$Z_{шп}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$B_{зав}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{ін}$ – інші виробничі витрати, грн.;

$B_{пв}$ – поза виробничі витрати, грн.

Таблиця 3.3 – Склад матеріальних витрат на модернізацію робота

№ п/п	Матеріали, покупні напівфабрикати та комплектуючі вироби	Одиниця	Витрати (шт, кг)	Ціна, грн	Витрати на виріб, грн.
Основні матеріали					
1.	Сталь легована	кг	10,0	43,80	438,00
2.	Алюміній	кг	0,5	200,00	100,00
	Всього	–	–	–	538,00
Покупні комплектуючі					
1.	Комплект підшипників	шт.	1	6250,0	6250,00
2.	Стопорні кільця	шт.	4	28,0	112,00
					6362,0

Розрахунки собівартості робота зводимо до табл. 3.4.

Повну собівартість модернізованого робота визначаємо за формулою:

$$C_{\text{пов.пр}} = C_{\text{пов.б}} - \sum_1^m C_{\text{ан.пов}} + C_{\text{пов.мод}}, \quad (3.7)$$

де $C_{\text{пов.б}}$ – повна собівартість базового верстата, грн.;

m – кількість анульованих деталей та вузлів;

$C_{\text{ан.пов}}$ – собівартість анульованих деталей та вузлів, грн.;

$C_{\text{пов.мод}}$ – повна собівартість деталей та вузлів, що розроблюються (собівартість модернізації), грн.

$$C_{\text{пов.пр}} = 130996 - 14335 + 20672 = 137333 \text{ грн.}$$

Таблиця 3.4 – Повна собівартість модернізації робота-маніпулятора

№ п.п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1	2	3	4	5
1.	Матеріали основні	M_o	табл. 4.3	538,00
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4% від M_o	32,28
3.	Покупні напівфабрикати, комплектуючі вироби та послуги інших підприємств	Π_n	табл. 4.3	6362,00
4.	Зворотні відходи	$-B_{зв}$	5% від M_o	80,70
5.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	6% від $(M_o + M_d + \Pi_n)$	277,29
6.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$\Pi_{\text{тех}}, E_{\text{тех}}$	78,8% від $З_{ор}$	961,38
7.	Всього матеріальні витрати			8090,25
8.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.2	1607,66
9.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	160,77
10.	Відрахування в фонд соціального страхування	B_{cc}	22% від $(З_{ор} + З_{др})$	389,05

Продовження табл. 3.4

1	2	3	4	5
11.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$Z_{уп}$	8,5% від $Z_{ор}$	136,65
12.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.2	3843,86
13.	Цехові витрати	$B_{цех}$	табл. 4.2	3224,30
14.	Загальнозаводські витрати	$B_{зав}$	220% від $Z_{ор}$	2893,78
15.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	1,43% від $Z_{ор}$	40,19
16.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	$\Sigma(7 \div 15)$	20386,50
17.	Позавиробничі витрати	$B_{пв}$	1,0% від $C_{вир}$	285,41
18.	Повна собівартість	$C_{пов.мод}$	$C_{вир} + B_{пв}$	20672,00

Оптову ціну нового робота-маніпулятора розраховуємо за формулою:

$$Ц_{опт} = C_{нов} + П_n = C_{нов} \cdot \left(1 + \frac{P_n}{100}\right), \quad (3.8)$$

де $П_n$, P_n – відповідно плановий прибуток та рівень рентабельності робота-маніпулятора, грн.

$$Ц_{опт} = 137333 \cdot \left(1 + \frac{20}{100}\right) = 164800 \text{ грн.}$$

3.4 Визначення експлуатаційних витрат при застосуванні роботів

Визначення експлуатаційних витрат будемо проводити двох варіантів: базового та нового. До розрахунку включаються лише ті статті витрат, які відрізняються у порівнюваних варіантах. Кошторис річних експлуатаційних витрат розраховується за такими статтями:

- витрати на електроенергію силову;
- витрати на допоміжні матеріали;
- витрати на ремонт;
- витрати на утримання приміщення;
- амортизаційні відрахування;
- витрати на переналагодження робота.

Витрати на електроенергію силову:

$$B_e = \frac{N_B \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot T_{\text{нор}} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (3.9)$$

де N_B – встановлена потужність електродвигунів робота, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи двигунів (приймають 0,65...0,8);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для фрезерної обробки – 0,6...0,7);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за часом (приймають 0,4);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів – 0,86;

η_m – коефіцієнт, який враховує втрати електроенергії в мережі підприємства;

$T_{\text{нор}}$ – норма часу на виконання операції, хв.;

$C_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії без ПДВ, грн.

В базовому варіанті:

$$B_{\text{ел}}^{\text{баз}} = \frac{(0,75 \cdot 0,22 + 0,7 \cdot 0,04) \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot 8,235 = 0,2893 \text{ грн.};$$

В проектному варіанті:

$$B_{\text{ел}}^{\text{пр}} = \frac{0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{0,86 \cdot 0,92} \cdot 0,26 \cdot 8,235 = 0,2923 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{нор}}}{100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (3.10)$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини робота, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_{\text{п}} = 1,0$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{баз}} = \frac{78,5 \cdot 7 \cdot 0,26}{100} \cdot 1,0 = 1,4287 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{78,5 \cdot 8 \cdot 0,26}{100} \cdot 1,0 = 1,6328 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot \Gamma_{\text{вс}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot T_{\text{нор}}, \quad (3.11)$$

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{вс}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин верстата, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 3950 год.).

$$B_{\text{р}}^{\text{баз}} = \frac{7 \cdot 968 + 18 \cdot 792}{3950} \cdot 0,26 = 1,3844 \text{ грн.};$$

$$B_p^{\text{пр}} = \frac{8 \cdot 968 + 20 \cdot 792}{3950} \cdot 0,26 = 1,5523 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_o \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot T_{\text{нор}}, \quad (3.12)$$

де F_o – виробнича площа, яку займає робот, включаючи площу його переміщення, м^2 ;

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м^2 виробничого приміщення, грн./м^2 .

$$B_{\text{уп}}^{\text{баз}} = \frac{1,6 \cdot 0,26}{3950} \cdot 788 = 0,0829 \text{ грн.};$$

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{2,0 \cdot 788 \cdot 0,26}{3950} = 0,1038 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію робота:

$$B_a = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_a}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot T_{\text{нор}}, \quad (3.13)$$

де H_a – норма амортизації, %;

$\Phi_{\text{бал}}$ – балансова вартість робота, грн.

Балансову вартість робіт знайдемо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = C_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{гр}} + K_{\text{м}}), \quad (3.14)$$

де $C_{\text{опт}}$ – оптова ціна робота, грн.;

$K_{\text{тр}}$, $K_{\text{м}}$, $K_{\text{ф}}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1) та монтаж (0,04...0,06) робота.

Таким чином, балансова вартість:

– базового робота:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} = 157200 \cdot (1 + 0,06 + 0,05) = 172920 \text{ грн.},$$

– нового робота:

$$\Phi_{\text{бал}}^{\text{нр}} = 164800 \cdot (1 + 0,06 + 0,05) = 181280 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{баз}} = \frac{172920 \cdot 20 \cdot 0,26}{3950 \cdot 100} = 2,2764 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{\text{нр}} = \frac{181280 \cdot 20 \cdot 0,26}{3950 \cdot 100} = 2,3865 \text{ грн.}$$

Витрати на переналагодження проєктного робота:

$$B_{\text{н}} = C_{\text{зн}} \cdot (1 + K_{\text{д}})(1 + K_{\text{с}}) \frac{T_{\text{нал}} \cdot A}{60 \cdot N_{\text{д}}}, \quad (3.15)$$

де $C_{\text{зн}}$ – годинна тарифна ставка наладчика, грн./год.;

A – кількість налагоджень на рік;

$T_{\text{нал}}$ – час налагодження, хв.;

$N_{\text{д}}$ – річна програма випуску деталей, шт./рік.

$$B_n^{np} = 101,019(1 + 0,1)(1 + 0,22) \frac{0,31 \cdot 12}{60 \cdot 10000} = 0,0008 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Експлуатаційні витрати

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Силова електроенергія	$B_{\text{ел}}$	0,2893	0,2923
2.	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	1,4287	1,6328
3.	Ремонт робота	$B_{\text{р}}$	1,3844	1,5523
4.	Утримання приміщення	$B_{\text{уп}}$	0,0829	0,1038
5.	Амортизація робота	$B_{\text{а}}$	2,2764	2,3865
6.	Переналагодження робота	$B_{\text{н}}$	-	0,0008
Загальна сума		$B_{\text{е}}$	5,4617	5,9685

3.5 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект, який отримує виробник модернізованого робота, розраховуємо за формулою:

$$E_{\text{рв}} = (C_{\text{опт}}^{\text{пр}} - C_{\text{пов}}^{\text{пр}}) \cdot P_{\text{в}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{в}}, \quad (3.16)$$

де $C_{\text{опт}}^{\text{пр}}$ – оптова ціна проектного робота, грн.;

$C_{\text{пов}}^{\text{пр}}$ – повна собівартість проектного робота, грн.;

$P_{\text{в}}$ – програма виробництва роботів, шт./рік;

$E_{\text{н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень ($E_{\text{н}} = 0,16$);

$K_{\text{в}}$ – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_{\theta} = B_{\text{пк}} + B_{\text{т}}, \quad (3.17)$$

де $B_{\text{пк}}$, $B_{\text{т}}$ – відповідно вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$K_{\theta} = 3481,94 + 3923,61 = 7405,55 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рв}} = (164800 - 137333) \cdot 1 - 0,16 \cdot 7405,55 = 26300 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект у споживача розрахуємо за формулою:

$$E_{\text{рсп}} = (B_{\text{е}}^{\text{баз}} - B_{\text{е}}^{\text{пр}}) \cdot N_{\text{д}} - E_{\text{н}} \cdot K_{\text{сп}}, \quad (3.18)$$

де $P_{\text{е}}^{\text{баз}}$, $P_{\text{е}}^{\text{пр}}$ – експлуатаційні витрати відповідно в базовому та проектному варіантах, грн.;

$N_{\text{д}}$ – річна програма випуску деталі, шт./рік;

$K_{\text{сп}}$ – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{\text{сп}} = \Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}} \cdot Q_{\text{пр}} - \Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}} \cdot Q_{\text{баз}}, \quad (3.19)$$

$\Phi_{\text{бал}}^{\text{пр}}$, $\Phi_{\text{бал}}^{\text{баз}}$ – відповідно балансова вартість проектного та базових робіт, грн.;

$Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{баз}}$ – потреба у роботах для виконання річної виробничої програми виготовлення деталей.

$$K_{\text{сп}} = 181280 \cdot 1 - 172920 \cdot 2 = -164560 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{рсп}} = (5,4617 - 5,9685) \cdot 10000 - 0,16 \cdot (-164560) = 21300 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника:

$$T_{окв} = \frac{K_{\sigma}}{(C_{опт}^{пр} - C_{пов}^{пр}) \cdot P_{в}} = \frac{7405,55}{(164800 - 137333) \cdot 1} = 0,3 \text{ року} = 3,2 \text{ міс.} \quad (3.20)$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Підсумкові техніко-економічні показники проекту

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1	2	3	4	5	6
1.	Потреба у роботах	шт./рік	2	1	-50,0
2.	Річний випуск виробів	шт./рік	10000	10000	—
3.	Штучний час виконання операцій: - механічної обробки - транспортування - заміна робочого органу та ПЗ	хв. хв. хв.	0,22 0,04 —	0,22 0,04 0,31	
4.	Повна собівартість - модернізації робота - модернізованого робота	грн. грн.	 —	20672 137333	 —
5.	Оптова ціна роботи	грн.	157200	164800	+4,8
6.	Експлуатаційні витрати із застосуванням робота (на один виріб)	грн.	5,4617	5,9685	+9,3
7.	Капітальні витрати на конструкторську та технологічну підготовку виробництва	грн.	—	7406	—
8.	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	міс.	—	3,2	—
9.	Річний економічний ефект: а) у виробника б) у споживача	грн. грн.	— —	26300 21300	— —

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі за другим (магістерським) рівнем вищої освіти розв'язане важливе науково-технічне завдання синтезу п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини за умови мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- проведено огляд існуючих типів промислових роботів;
- проаналізовані тенденції розвитку промислових роботів;
- обрано прототипи для пропонованої конструкції п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини;
- розроблено схематичну конструкцію п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини;
- визначено конструктивні залежності п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини за умови мінімізації його габаритних розмірів при забезпеченні заданої рухомості у обраному робочому просторі.

Проведений огляд промислових роботів продемонстрував дві тенденції, що превалюють на сучасному етапі їх розвитку, а саме використання маніпуляторів з замкненими кінематичними ланцюгами та розміщення двигунів приводів на базисних елементах робота. Зазначеним тенденціям у повній мірі задовольняє технологічне обладнання, побудоване з використанням паралельних кінематичних структур. В даній роботі представлено нову конструкцію п'ятикоординатного робота з приводом повороту руки зі штангами змінної довжини. Серед її переваг, окрім одночасного застосування двох основних тенденцій розвитку робототехніки, є розділення поділ рухів вихідного органу робота на лінійні і кутові переміщення. Такий підхід дозволяє суттєво розширити величини рухів чи

мінімізувати габаритні розміри маніпулятора в порівнянні з тими конструкціями, де такого поділу рухів не відбувається.

На основі запропонованої схематичної конструкції робота отримано конструктивні залежності для синтезу приводу лінійних переміщень рухомої платформи та приводу повороту руки і орієнтації кисті (захватного пристрою), що дозволяє розрахувати їх параметри при забезпеченні повної рухомості руки в межах обраного робочого простору, за форму якого обрано циліндр. Проведено дослідження отриманих конструктивних залежностей, основними значимими висновками якого є рекомендація до збільшення величини коефіцієнта зміни довжини штанги приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою), за якого цей привод буде більш компактним. Також показано, що вплив діаметру робочого простору на конструктивні параметри приводу повороту руки та орієнтації кисті (захватного пристрою), виявився більшим, ніж вплив на них висоти робочого простору. Зростання діаметру робочого простору в 3 рази призводить до зростання параметру W в 1,21 рази, параметру C в 1,95 рази, мінімальної довжини штанги L в 1,28 рази, а аналогічне зростання висоти робочого простору призводить до зростання параметру W в 1,27 раз, параметру C в 1,16 раз, мінімальної довжини штанги L в 1,36 раз. Це пояснюється тим, що діаметр робочого простору відкладається по двом координатам системи відліку, в той час як висота робочого простору відкладається по одній координаті прийнятої системи відліку. Показано, що за обраних розмірів робочого простору вплив кута повороту кисті (захватного пристрою) на конструктивні параметри приводу повороту руки та орієнтації цієї кисті виявився мінімальним, зміна всіх параметрів не перевищує 10 відсотків.

Додатково до поставленої мети підтверджено економічну ефективність від впровадження проекту п'ятикоординатного робота. Очікуваний економічний ефект у виробника продукції в складає 26300 грн, у споживача – 21300 грн. Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника становить 3,2 місяці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. http://wwwcdl.bmstu.ru/rk2-tmm/lect_19.htm.
2. Пат. на кор. модель 122703 Україна, МПК (2006) B23Q5/00 B23Q5/32 (2006.01). Верстат з комбінованою кінематичною структурою / Гречка А.І., Лимар Я.В.; заявник і патентовласник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u201707219; заявл. 10.07.2017; опубл. 25.01.2018, Бюл. № 2.
3. Пат. на кор. модель 131326 Україна, МПК (2006) B23Q5/00. П'ятикоординатний механізм паралельної структури з трьома напрямними / Гречка А.І., Ковальчук А.В., Лесь В.С.; заявник і патентовласник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u201807696; заявл. 09.07.2018; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1.
4. Павленко І.І. Захватні пристрої роботів / І.І. Павленко, М.О. Годунко // Захватні пристрої роботів: монографія. – Кропивницький: «КОД», 2020. – 386 с.
5. Павленко І.І. Дослідження кутових переміщень платформи МПС із різжучим інструментом / І. І. Павленко, М. О. Годунко, О. А. Кислун, Є. С. Костюк // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2020. - Вип. 3 (34). - С. 117-129.
6. Годунко М.О. Розробка методики силового розрахунку вертикально орієнтованого хватного пристрою / М.О. Годунко, О.А. Кислун, В.А. Мажара, В.К. Щербина, Р.А. Кравченко, В.В. Ключкін // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - Вип. 7 (38). – С. 27-33.
7. Годунко М.О. Дослідження можливості підвищення точності хватного пристрою робота за рахунок компенсуючої ланки затискного важеля. Годунко М.О., Мажара В.А., Кислун О.С., Щербина В.К., Писанка С.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки : зб. Наук пр. – Хмельницький : ХНУ, 2024. – Вип. №3. – С. 52-56.

8. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою.- Кіровоград.2004. - 449с.
9. Валявський, І. А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навч. посіб. / І. А. Валявський, О. В. Лисенко, І. А. Лисенко ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 281 с.
10. Кузнецов Ю.Н., Дмитриев Д.А., Диневич Г.Е. Компонировки станков с механизмами параллельной структуры / Под ред. Ю.Н. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2010. – 471 с.
11. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 420 с.
12. Павленко І.І. Рухові характеристики промислових роботів. – Кіровоград: КДТУ, 2000. – 124 с.
13. Павленко І.І. Структура промислових роботів. – Кіровоград: КІСМ, 1998. – 100 с.
14. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. – Житомир, ЖІТІ, 2001. – 612 с.
15. Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів. – Житомир, ЖІТІ, 2002. – 570 с.
16. Clavel, R., "Device for the Movement and Positioning of an Element in Space," US Patent No. 4,976,582, December 11, 1990.
17. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 40 с.
18. Організація виробництва на промисловому підприємстві / Під ред. Ю.А. Єгупова Київ: Центр навч. літератури, 2006. 488 с.
19. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник // Под общ. ред. К.М. Великанова. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1990. 448 с.

20. Пузирьов О.Л. Аналіз ефективності впровадження волочильного стану для підготовки заготовок з металопрокату для верстатів з ЧПК / О.Л. Пузирьов, А.І. Гречка // Технології та інжиніринг. – К.: КНТУТД, 2024. – Вип. 5 (22). – С. 71-78.

```
Clear[p,v,s,d,h,n,f,b,l,w,c];
```

```
Solve[{1^2==(c-s*Cos[f]-d/2)^2+(-p-v+w)^2,
n^2*1^2==(d/2+s)^2+(c+d/2+p+v)^2+(h+w+s*Cos[f])^2,
Tan[b]==(c-s*Cos[f]-d/2)/(h-p-v+w)},{w,c,l}]
```

```
{ {1->-Sqrt[Tan[b]^2*p^2+p^2-2*h*Tan[b]^2*p+2*v*Tan[b]^2*p+2*v*p+
v^2+h^2*Tan[b]^2+v^2*Tan[b]^2-2*h*v*Tan[b]^2-
(1/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4))*
(p*(-8*h*Tan[b]^2*n^2+8*p*Tan[b]^2*n^2+8*v*Tan[b]^2*n^2+
8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*Tan[b]^2-8*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+
8*h+8*s*Cos[f]-Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-
8*v*Tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+
8*p*Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2-8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-
8*p*Tan[b]-8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b])^2-
4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d-
4*s*d-8*v*d-8*s*Cos[f]*d-8*h*Tan[b]*d+8*p*Tan[b]*d+
8*v*Tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-
4*v^2-8*s^2*Cos[f]^2-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+
4*n^2*p^2*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2-
4*v^2*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-
8*h*n^2*v*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-
8*p*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*Cos[f]-
8*p*s*Cos[f]-8*s*v*Cos[f]+8*p^2*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]-
8*h*p*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[
b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))+
8*d*Tan[b]+8*p*Tan[b]+8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b]))-
(1/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4))*
(v*(-8*h*Tan[b]^2*n^2+8*p*Tan[b]^2*n^2+8*v*Tan[b]^2*n^2+
8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*Tan[b]^2-8*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+
8*h+8*s*Cos[f]-Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-
8*v*Tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+
8*p*Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2-8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-
8*p*Tan[b]-8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b])^2-
4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d-
4*s*d-8*v*d-8*s*Cos[f]*d-8*h*Tan[b]*d+8*p*Tan[b]*d+
8*v*Tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-
4*v^2-8*s^2*Cos[f]^2-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+
4*n^2*p^2*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2-
4*v^2*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-
8*h*n^2*v*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-
8*p*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*Cos[f]-
8*p*s*Cos[f]-8*s*v*Cos[f]+8*p^2*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]-
8*h*p*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[
b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))+
8*d*Tan[b]+8*p*Tan[b]+8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b]))-
(1/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4))*
(p*Tan[b]^2*(-8*h*Tan[b]^2*n^2+8*p*Tan[b]^2*n^2+
8*v*Tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*Tan[b]^2-
8*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+8*h+8*s*Cos[f]-
Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-8*v*Tan[b]^2*n^2-
8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+8*p*Tan[b]^2+
8*v*Tan[b]^2-8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-8*p*Tan[b]-
8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b])^2-4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-
4*Tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d-
8*s*Cos[f]*d-8*h*Tan[b]*d+8*p*Tan[b]*d+8*v*Tan[b]*d-
4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-
8*s^2*Cos[f]^2-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+
4*n^2*p^2*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2-
4*v^2*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-
8*h*n^2*v*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-
```

$$\begin{aligned}
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[\\
& b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))* \\
& (v*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2- \\
& 8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+8*s*\cos[f]- \\
& \sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]- \\
& 8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2-4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2- \\
& 4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d- \\
& 8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+8*v*\tan[b]*d- \\
& 4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2- \\
& 8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[\\
& b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& (1/(4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)^2))* \\
& (-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+ \\
& 8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+ \\
& 8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2-4* \\
& (4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]-
\end{aligned}$$

```

8*h*p*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[
b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+8*s*v*Cos[f]*Tan[b]])+
8*d*Tan[b]+8*p*Tan[b]+8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b])^2+
(1/(4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)^2))*
(Tan[b]^2*(-8*h*Tan[b]^2*n^2+8*p*Tan[b]^2*n^2+8*v*Tan[b]^2*n^2+
8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*Tan[b]^2-8*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+
8*h+8*s*Cos[f]-Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-8*v*
Tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+8*p*
Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2-8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-8*p*
Tan[b]-8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b])^2-
4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*
s*d-8*v*d-8*s*Cos[f]*d-8*h*Tan[b]*d+8*p*Tan[b]*d+8*
v*Tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-
4*v^2-8*s^2*Cos[f]^2-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+
4*n^2*p^2*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2-4*
v^2*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-8*h*n^2*
v*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-8*p*v*
Tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*Cos[f]-8*p*s*Cos[f]-
8*s*v*Cos[f]+8*p^2*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]-8*h*p*Tan[b]-8*
h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+8*p*s*
Cos[f]*Tan[b]+8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))+8*d*Tan[b]+
8*p*Tan[b]+8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b])^2]],
c->(1/2)*(-(8*h*n^2*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-
4))+(8*h*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+
(8*n^2*p*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)-
(8*p*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+
(8*n^2*v*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)-
(8*v*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+
(8*d*Tan[b]^2)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+
(8*p*Tan[b]^2)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+
(8*v*Tan[b]^2)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+
(8*s*Cos[f]*Tan[b]^2)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+
2*h*Tan[b]-2*p*Tan[b]-2*v*Tan[b]+(8*h*Tan[b])/
(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+(8*n^2*p*Tan[b])/
(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+(8*n^2*v*Tan[b])/
(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+(8*s*Cos[f]*Tan[b])/
(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+d+2*s*Cos[f]-
(1/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4))*
(Tan[b]*Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-8*v*Tan[b]^2*n^2-
8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+8*p*Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2-
8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-8*p*Tan[b]-8*v*Tan[b]-
8*s*Cos[f]*Tan[b])^2-4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-
4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d-8*s*Cos[f]*d-
8*h*Tan[b]*d+8*p*Tan[b]*d+8*v*Tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-
4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-8*s^2*Cos[f]^2-
4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+4*n^2*p^2*Tan[b]^2-
4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2-4*v^2*Tan[b]^2-
8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-8*h*n^2*v*Tan[b]^2+
8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-8*p*v*Tan[b]^2+
8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*Cos[f]-8*p*s*Cos[f]-8*s*v*Cos[f]+
8*p^2*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]-8*h*p*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+
16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+
8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))],
w->(1/(2*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)))*
(-8*h*Tan[b]^2*n^2+8*p*Tan[b]^2*n^2+8*v*Tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+
8*v*n^2+8*h*Tan[b]^2-8*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+8*h+
8*s*Cos[f]-Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-
8*v*Tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+
8*p*Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2-8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-
8*p*Tan[b]-8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b])^2-
4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-

```

$$\begin{aligned}
& 8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+8*v*\tan[b]*d- \\
& 4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2- \\
& 8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]-8*p*s*\cos[f]- \\
& 8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]- \\
& 8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[b]+ \\
& 8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b])]+8*d*\tan[b]+ \\
& 8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]), \\
& (1 \rightarrow \sqrt{\tan[b]^2*p^2+p^2-2*h*\tan[b]^2*p+2*v*\tan[b]^2*p+2*v*p+ \\
& v^2+h^2*\tan[b]^2+v^2*\tan[b]^2-2*h*v*\tan[b]^2- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))})* \\
& (p*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)))* \\
& (v*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)))* \\
& (p*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))* \\
& (v*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))* \\
& (h*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& (1/(4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)^2))* \\
& (-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+ \\
& 8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+ \\
& 8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2-
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]]+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b])^2+ \\
& (1/(4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)^2))* \\
& (\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[\\
& b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b])^2], \\
& c \rightarrow (1/2)*(-(8*h*n^2*\tan[b]^3)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2- \\
& 4))+(8*h*\tan[b]^3)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+ \\
& (8*n^2*p*\tan[b]^3)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)- \\
& (8*p*\tan[b]^3)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+ \\
& (8*n^2*v*\tan[b]^3)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)- \\
& (8*v*\tan[b]^3)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+ \\
& (8*d*\tan[b]^2)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+ \\
& (8*p*\tan[b]^2)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+ \\
& (8*v*\tan[b]^2)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+ \\
& (8*s*\cos[f]*\tan[b]^2)/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+ \\
& 2*h*\tan[b]-2*p*\tan[b]-2*v*\tan[b]+(8*h*\tan[b])/ \\
& (4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+(8*n^2*p*\tan[b])/ \\
& (4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+(8*n^2*v*\tan[b])/ \\
& (4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+(8*s*\cos[f]*\tan[b])/ \\
& (4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)+d+2*s*\cos[f]- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))* \\
& (\tan[b]*\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2- \\
& 8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]- \\
& 8*s*\cos[f]*\tan[b])^2-4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2- \\
& 4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d- \\
& 8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2- \\
& 4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2- \\
& 4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+4*n^2*p^2*\tan[b]^2- \\
& 4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2-4*v^2*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2-8*h*n^2*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2-8*p*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]-8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+ \\
& 8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+ \\
& 16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+ \\
& 8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))), \\
& w \rightarrow (1/(2*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)))* \\
& (-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+ \\
& 8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+ \\
& 8*s*\cos[f]-\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d- \\
& 8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+8*v*\tan[b]*d- \\
& 4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2- \\
& 8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]-8*p*s*\cos[f]- \\
& 8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]- \\
& 8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[b]+ \\
& 8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+8*d*\tan[b]+ \\
& 8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))), \\
& \{1-\sqrt{\tan[b]^2*p^2+p^2-2*h*\tan[b]^2*p+2*v*\tan[b]^2*p+2*v*p+ \\
& v^2+h^2*\tan[b]^2+v^2*\tan[b]^2-2*h*v*\tan[b]^2-} \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)))* \\
& (p*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]+\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2-} \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[\\
& b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)))* \\
& (v*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]+\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2-} \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[\\
& b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)))* \\
& (p*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2- \\
& 8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+8*s*\cos[f]+ \\
& \sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]- \\
& 8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2-4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d- \\
& 8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+8*v*\tan[b]*d- \\
& 4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2- \\
& 8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[\\
& b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))- \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))* \\
& (v*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2- \\
& 8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+8*s*\cos[f]+ \\
& \sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]- \\
& 8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2-4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2- \\
& 4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d- \\
& 8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+8*v*\tan[b]*d- \\
& 4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2- \\
& 8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[\\
& b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4))* \\
& (h*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2- \\
& 8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+8*s*\cos[f]+ \\
& \sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2+ \\
& 8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]- \\
& 8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2-4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2- \\
& 4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d- \\
& 8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+8*v*\tan[b]*d- \\
& 4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2- \\
& 8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2- \\
& 4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2- \\
& 8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[\\
& b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& 8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]))+ \\
& (1/(4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)^2))* \\
& (-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+ \\
& 8*v*n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+ \\
& 8*s*\cos[f]+\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2- \\
& 8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]- \\
& 8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d- \\
& 4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 8*v*Tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*Cos[f]^2-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2- \\
& 4*v^2*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2- \\
& 8*p*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*Cos[f]- \\
& 8*p*s*Cos[f]-8*s*v*Cos[f]+8*p^2*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]- \\
& 8*h*p*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[\\
& b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))+ \\
& 8*d*Tan[b]+8*p*Tan[b]+8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b])^2+ \\
& (1/(4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)^2))* \\
& (Tan[b]^2*(-8*h*Tan[b]^2*n^2+8*p*Tan[b]^2*n^2+8*v*Tan[b]^2*n^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v*n^2+8*h*Tan[b]^2-8*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*Cos[f]+Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-8*v* \\
& Tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+8*p* \\
& Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2-8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-8*p* \\
& Tan[b]-8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b])^2- \\
& 4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4* \\
& s*d-8*v*d-8*s*Cos[f]*d-8*h*Tan[b]*d+8*p*Tan[b]*d+8* \\
& v*Tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2- \\
& 4*v^2-8*s^2*Cos[f]^2-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2-4* \\
& v^2*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-8*h*n^2* \\
& v*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-8*p*v* \\
& Tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*Cos[f]-8*p*s*Cos[f]- \\
& 8*s*v*Cos[f]+8*p^2*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]-8*h*p*Tan[b]-8* \\
& h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+8*p*s* \\
& Cos[f]*Tan[b]+8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))+8*d*Tan[b]+ \\
& 8*p*Tan[b]+8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b])^2)], \\
& c->(1/2)*(-(8*h*n^2*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2- \\
& 4))+(8*h*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+ \\
& (8*n^2*p*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)- \\
& (8*p*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+ \\
& (8*n^2*v*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)- \\
& (8*v*Tan[b]^3)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+ \\
& (8*d*Tan[b]^2)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+ \\
& (8*p*Tan[b]^2)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+ \\
& (8*v*Tan[b]^2)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+ \\
& (8*s*Cos[f]*Tan[b]^2)/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+ \\
& 2*h*Tan[b]-2*p*Tan[b]-2*v*Tan[b]+(8*h*Tan[b])/ \\
& (4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+(8*n^2*p*Tan[b])/ \\
& (4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+(8*n^2*v*Tan[b])/ \\
& (4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+(8*s*Cos[f]*Tan[b])/ \\
& (4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)+d+2*s*Cos[f]+ \\
& (1/(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4))* \\
& (Tan[b]*Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-8*v*Tan[b]^2*n^2- \\
& 8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+8*p*Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2- \\
& 8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-8*p*Tan[b]-8*v*Tan[b]- \\
& 8*s*Cos[f]*Tan[b])^2-4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2- \\
& 4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d-8*s*Cos[f]*d- \\
& 8*h*Tan[b]*d+8*p*Tan[b]*d+8*v*Tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2- \\
& 4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-8*s^2*Cos[f]^2- \\
& 4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+4*n^2*p^2*Tan[b]^2- \\
& 4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2-4*v^2*Tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-8*h*n^2*v*Tan[b]^2+ \\
& 8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-8*p*v*Tan[b]^2+ \\
& 8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*Cos[f]-8*p*s*Cos[f]-8*s*v*Cos[f]+ \\
& 8*p^2*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]-8*h*p*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+ \\
& 16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+ \\
& 8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))), \\
& w->(1/(2*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)))*
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*v^n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*h+ \\
& 8*s*\cos[f]+\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v^n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+8*v*\tan[b]*d- \\
& 4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2-4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2-8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]-8*p*s*\cos[f]- \\
& 8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]*\tan[b]+ \\
& 8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b] \}, \\
& \{1 \rightarrow \sqrt{\tan[b]^2*p^2+p^2-2*h*\tan[b]^2*p+2*v*\tan[b]^2*p+2*v*p+v^2+h^2*\tan[b]^2+v^2*\tan[b]^2-2*h*v*\tan[b]^2-} \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)) * \\
& (p*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v^n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]+\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v^n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2-4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2-8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b] \} \} - \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)) * \\
& (v*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v^n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]+\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v^n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2-4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2-8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b] \} \} - \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)) * \\
& (p*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v^n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*h+8*s*\cos[f]+\sqrt{(8*h*\tan[b]^2*n^2-8*p*\tan[b]^2*n^2-8*v*\tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v^n^2-8*h*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*h-8*s*\cos[f]-8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b])^2- \\
& 4*(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-8*v*d-8*s*\cos[f]*d-8*h*\tan[b]*d+8*p*\tan[b]*d+ \\
& 8*v*\tan[b]*d-4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-8*s^2*\cos[f]^2-4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+ \\
& 4*n^2*p^2*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2-4*v^2*\tan[b]^2-8*h*n^2*p*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*v*\tan[b]^2+8*h*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v*\tan[b]^2-8*p*v*\tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]+8*p^2*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]-8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]-8*h*s*\cos[f]* \\
& \tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]))+8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b] \} \} - \\
& (1/(4*\tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*\tan[b]^2-4)) * \\
& (p*\tan[b]^2*(-8*h*\tan[b]^2*n^2+8*p*\tan[b]^2*n^2+8*v*\tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+8*v^n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*p*n^2+8*v^n^2+8*h*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 8^*h+8^*s*\text{Cos}[f]+\text{Sqrt}[(8^*h^* \text{Tan}[b]^2*n^2-8^*p^* \text{Tan}[b]^2*n^2- \\ & 8^*v^* \text{Tan}[b]^2*n^2-8^*p^*n^2-8^*h^* \text{Tan}[b]^2+ \\ & 8^*p^* \text{Tan}[b]^2+8^*v^* \text{Tan}[b]^2-8^*h-8^*s*\text{Cos}[f]-8^*d^* \text{Tan}[b]- \\ & 8^*p^* \text{Tan}[b]-8^*v^* \text{Tan}[b]-8^*s*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b])^2- \\ & 4*(4^* \text{Tan}[b]^2*n^2+4^*n^2-4^* \text{Tan}[b]^2-4)*(-5^*d^2-8^*p^*d- \\ & 4^*s^*d-8^*v^*d-8^*s*\text{Cos}[f]*d-8^*h^* \text{Tan}[b]*d+8^*p^* \text{Tan}[b]*d+ \\ & 8^*v^* \text{Tan}[b]*d-4^*h^2+4^*n^2*p^2-4^*p^2-4^*s^2+4^*n^2*v^2- \\ & 4^*v^2-8^*s^2*\text{Cos}[f]^2-4^*h^2* \text{Tan}[b]^2+4^*h^2*n^2* \text{Tan}[b]^2+ \\ & 4^*n^2*p^2* \text{Tan}[b]^2-4^*p^2* \text{Tan}[b]^2+4^*n^2*v^2* \text{Tan}[b]^2- \\ & 4^*v^2* \text{Tan}[b]^2-8^*h^*n^2*p^* \text{Tan}[b]^2+8^*h^*p^* \text{Tan}[b]^2- \\ & 8^*h^*n^2*v^* \text{Tan}[b]^2+8^*h^*v^* \text{Tan}[b]^2+8^*n^2*p^*v^* \text{Tan}[b]^2- \\ & 8^*p^*v^* \text{Tan}[b]^2+8^*n^2*p^*v-8^*p^*v-8^*h^*s*\text{Cos}[f]- \\ & 8^*p^*s*\text{Cos}[f]-8^*s^*v^*\text{Cos}[f]+8^*p^2* \text{Tan}[b]+8^*v^2* \text{Tan}[b]- \\ & 8^*h^*p^* \text{Tan}[b]-8^*h^*v^* \text{Tan}[b]+16^*p^*v^* \text{Tan}[b]-8^*h^*s*\text{Cos}[f]* \\ & \text{Tan}[b]+8^*p^*s*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b]+8^*s^*v^*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b]))+ \\ & 8^*d^* \text{Tan}[b]+8^*p^* \text{Tan}[b]+8^*v^* \text{Tan}[b]+8^*s*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b]))- \\ & (1/(4^* \text{Tan}[b]^2*n^2+4^*n^2-4^* \text{Tan}[b]^2-4))^* \\ & (v^* \text{Tan}[b]^2*(-8^*h^* \text{Tan}[b]^2*n^2+8^*p^* \text{Tan}[b]^2*n^2+8^*v^* \text{Tan}[b]^2*n^2+ \\ & 8^*p^*n^2+8^*v^*n^2+8^*h^* \text{Tan}[b]^2-8^*p^* \text{Tan}[b]^2-8^*v^* \text{Tan}[b]^2+ \\ & 8^*h+8^*s*\text{Cos}[f]+\text{Sqrt}[(8^*h^* \text{Tan}[b]^2*n^2-8^*p^* \text{Tan}[b]^2*n^2- \\ & 8^*v^* \text{Tan}[b]^2*n^2-8^*p^*n^2-8^*h^* \text{Tan}[b]^2+ \\ & 8^*p^* \text{Tan}[b]^2+8^*v^* \text{Tan}[b]^2-8^*h-8^*s*\text{Cos}[f]-8^*d^* \text{Tan}[b]- \\ & 8^*p^* \text{Tan}[b]-8^*v^* \text{Tan}[b]-8^*s*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b])^2- \\ & 4*(4^* \text{Tan}[b]^2*n^2+4^*n^2-4^* \text{Tan}[b]^2-4)*(-5^*d^2-8^*p^*d- \\ & 4^*s^*d-8^*v^*d-8^*s*\text{Cos}[f]*d-8^*h^* \text{Tan}[b]*d+8^*p^* \text{Tan}[b]*d+ \\ & 8^*v^* \text{Tan}[b]*d-4^*h^2+4^*n^2*p^2-4^*p^2-4^*s^2+4^*n^2*v^2- \\ & 4^*v^2-8^*s^2*\text{Cos}[f]^2-4^*h^2* \text{Tan}[b]^2+4^*h^2*n^2* \text{Tan}[b]^2+ \\ & 4^*n^2*p^2* \text{Tan}[b]^2-4^*p^2* \text{Tan}[b]^2+4^*n^2*v^2* \text{Tan}[b]^2- \\ & 4^*v^2* \text{Tan}[b]^2-8^*h^*n^2*p^* \text{Tan}[b]^2+8^*h^*p^* \text{Tan}[b]^2- \\ & 8^*h^*n^2*v^* \text{Tan}[b]^2+8^*h^*v^* \text{Tan}[b]^2+8^*n^2*p^*v^* \text{Tan}[b]^2- \\ & 8^*p^*v^* \text{Tan}[b]^2+8^*n^2*p^*v-8^*p^*v-8^*h^*s*\text{Cos}[f]- \\ & 8^*p^*s*\text{Cos}[f]-8^*s^*v^*\text{Cos}[f]+8^*p^2* \text{Tan}[b]+8^*v^2* \text{Tan}[b]- \\ & 8^*h^*p^* \text{Tan}[b]-8^*h^*v^* \text{Tan}[b]+16^*p^*v^* \text{Tan}[b]-8^*h^*s*\text{Cos}[f]* \\ & \text{Tan}[b]+8^*p^*s*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b]+8^*s^*v^*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b]))+ \\ & 8^*d^* \text{Tan}[b]+8^*p^* \text{Tan}[b]+8^*v^* \text{Tan}[b]+8^*s*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b]))+ \\ & (1/(4^*(4^* \text{Tan}[b]^2*n^2+4^*n^2-4^* \text{Tan}[b]^2-4)^2))^* \\ & (-8^*h^* \text{Tan}[b]^2*n^2+8^*p^* \text{Tan}[b]^2*n^2+8^*v^* \text{Tan}[b]^2*n^2+8^*p^*n^2+ \\ & 8^*v^*n^2+8^*h^* \text{Tan}[b]^2-8^*p^* \text{Tan}[b]^2-8^*v^* \text{Tan}[b]^2+8^*h+ \\ & 8^*s*\text{Cos}[f]+\text{Sqrt}[(8^*h^* \text{Tan}[b]^2*n^2-8^*p^* \text{Tan}[b]^2*n^2- \\ & 8^*v^* \text{Tan}[b]^2*n^2-8^*p^*n^2-8^*h^* \text{Tan}[b]^2+ \\ & 8^*p^* \text{Tan}[b]^2+8^*v^* \text{Tan}[b]^2-8^*h-8^*s*\text{Cos}[f]-8^*d^* \text{Tan}[b]- \\ & 8^*p^* \text{Tan}[b]-8^*v^* \text{Tan}[b]-8^*s*\text{Cos}[f]* \text{Tan}[b])^2- \\ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 4 * (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) * (-5 * d^2 - 8 * p * d - \\ & 4 * s * d - 8 * v * d - 8 * s * \cos [f] * d - 8 * h * \tan [b] * d + 8 * p * \tan [b] * d + \\ & 8 * v * \tan [b] * d - 4 * h^2 + 4 * n^2 * p^2 - 4 * p^2 - 4 * s^2 + 4 * n^2 * v^2 - \\ & 4 * v^2 - 8 * s^2 * \cos [f]^2 - 4 * h^2 * \tan [b]^2 + 4 * h^2 * n^2 * \tan [b]^2 + \\ & 4 * n^2 * p^2 * \tan [b]^2 - 4 * p^2 * \tan [b]^2 + 4 * n^2 * v^2 * \tan [b]^2 - \\ & 4 * v^2 * \tan [b]^2 - 8 * h * n^2 * p * \tan [b]^2 + 8 * h * p * \tan [b]^2 - \\ & 8 * h * n^2 * v * \tan [b]^2 + 8 * h * v * \tan [b]^2 + 8 * n^2 * p * v * \tan [b]^2 - \\ & 8 * p * v * \tan [b]^2 + 8 * n^2 * p * v - 8 * p * v - 8 * h * s * \cos [f] - \\ & 8 * p * s * \cos [f] - 8 * s * v * \cos [f] + 8 * p^2 * \tan [b] + 8 * v^2 * \tan [b] - \\ & 8 * h * p * \tan [b] - 8 * h * v * \tan [b] + 16 * p * v * \tan [b] - 8 * h * s * \cos [f] * \\ & \tan [b] + 8 * p * s * \cos [f] * \tan [b] + 8 * s * v * \cos [f] * \tan [b])] + \\ & 8 * d * \tan [b] + 8 * p * \tan [b] + 8 * v * \tan [b] + 8 * s * \cos [f] * \tan [b])^2 + \\ & (1 / (4 * (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4)^2)) * \\ & (\tan [b]^2 * (-8 * h * \tan [b]^2 * n^2 + 8 * p * \tan [b]^2 * n^2 + 8 * v * \tan [b]^2 * n^2 + \\ & 8 * p * n^2 + 8 * v * n^2 + 8 * h * \tan [b]^2 - 8 * p * \tan [b]^2 - 8 * v * \tan [b]^2 + \\ & 8 * h + 8 * s * \cos [f] + \sqrt{(8 * h * \tan [b]^2 * n^2 - 8 * p * \tan [b]^2 * n^2 - \\ & 8 * v * \tan [b]^2 * n^2 - 8 * p * n^2 - 8 * v * n^2 - 8 * h * \tan [b]^2 + \\ & 8 * p * \tan [b]^2 + 8 * v * \tan [b]^2 - 8 * h - 8 * s * \cos [f] - 8 * d * \tan [b] - \\ & 8 * p * \tan [b] - 8 * v * \tan [b] - 8 * s * \cos [f] * \tan [b])^2 - \\ & 4 * (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) * (-5 * d^2 - 8 * p * d - \\ & 4 * s * d - 8 * v * d - 8 * s * \cos [f] * d - 8 * h * \tan [b] * d + 8 * p * \tan [b] * d + \\ & 8 * v * \tan [b] * d - 4 * h^2 + 4 * n^2 * p^2 - 4 * p^2 - 4 * s^2 + 4 * n^2 * v^2 - \\ & 4 * v^2 - 8 * s^2 * \cos [f]^2 - 4 * h^2 * \tan [b]^2 + 4 * h^2 * n^2 * \tan [b]^2 + \\ & 4 * n^2 * p^2 * \tan [b]^2 - 4 * p^2 * \tan [b]^2 + 4 * n^2 * v^2 * \tan [b]^2 - \\ & 4 * v^2 * \tan [b]^2 - 8 * h * n^2 * p * \tan [b]^2 + 8 * h * p * \tan [b]^2 - \\ & 8 * h * n^2 * v * \tan [b]^2 + 8 * h * v * \tan [b]^2 + 8 * n^2 * p * v * \tan [b]^2 - \\ & 8 * p * v * \tan [b]^2 + 8 * n^2 * p * v - 8 * p * v - 8 * h * s * \cos [f] - \\ & 8 * p * s * \cos [f] - 8 * s * v * \cos [f] + 8 * p^2 * \tan [b] + 8 * v^2 * \tan [b] - \\ & 8 * h * p * \tan [b] - 8 * h * v * \tan [b] + 16 * p * v * \tan [b] - 8 * h * s * \cos [f] * \tan [b] \\ & + 8 * p * s * \cos [f] * \tan [b] + 8 * s * v * \cos [f] * \tan [b])] + \\ & 8 * d * \tan [b] + 8 * p * \tan [b] + 8 * v * \tan [b] + 8 * s * \cos [f] * \tan [b])^2] , \\ & c \rightarrow (1 / 2) * (-((8 * h * n^2 * \tan [b]^3) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4)) + \\ & (8 * h * \tan [b]^3) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + \\ & (8 * n^2 * p * \tan [b]^3) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) - \\ & (8 * p * \tan [b]^3) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + \\ & (8 * n^2 * v * \tan [b]^3) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) - \\ & (8 * v * \tan [b]^3) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + \\ & (8 * d * \tan [b]^2) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + \\ & (8 * p * \tan [b]^2) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + \\ & (8 * v * \tan [b]^2) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + \\ & (8 * s * \cos [f] * \tan [b]^2) / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + \\ & 2 * h * \tan [b] - 2 * p * \tan [b] - 2 * v * \tan [b] + (8 * h * \tan [b]) / \\ & (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + (8 * n^2 * p * \tan [b]) / \\ & (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + (8 * n^2 * v * \tan [b]) / \\ & (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + (8 * s * \cos [f] * \tan [b]) / \\ & (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) + d + 2 * s * \cos [f] + \\ & (1 / (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4)) * \\ & (\tan [b] * \sqrt{(8 * h * \tan [b]^2 * n^2 - 8 * p * \tan [b]^2 * n^2 - 8 * v * \tan [b]^2 * n^2 - \\ & 8 * p * n^2 - 8 * v * n^2 - 8 * h * \tan [b]^2 + 8 * p * \tan [b]^2 + 8 * v * \tan [b]^2 - \\ & 8 * h - 8 * s * \cos [f] - 8 * d * \tan [b] - 8 * p * \tan [b] - 8 * v * \tan [b] - \\ & 8 * s * \cos [f] * \tan [b])^2 - 4 * (4 * \tan [b]^2 * n^2 + 4 * n^2 - 4 * \tan [b]^2 - 4) * (-5 * d^2 - 8 * p * d - \\ & 4 * s * d - 8 * v * d - 8 * s * \cos [f] * d - \\ & 8 * h * \tan [b] * d + 8 * p * \tan [b] * d + 8 * v * \tan [b] * d - 4 * h^2 + 4 * n^2 * p^2 - \\ & 4 * p^2 - 4 * s^2 + 4 * n^2 * v^2 - 4 * v^2 - 8 * s^2 * \cos [f]^2 - \\ & 4 * h^2 * \tan [b]^2 + 4 * h^2 * n^2 * \tan [b]^2 + 4 * n^2 * p^2 * \tan [b]^2 - \\ & 4 * p^2 * \tan [b]^2 + 4 * n^2 * v^2 * \tan [b]^2 - 4 * v^2 * \tan [b]^2 - \\ & 8 * h * n^2 * p * \tan [b]^2 + 8 * h * p * \tan [b]^2 - 8 * h * n^2 * v * \tan [b]^2 + \\ & 8 * h * v * \tan [b]^2 + 8 * n^2 * p * v * \tan [b]^2 - 8 * p * v * \tan [b]^2 + \\ & 8 * n^2 * p * v - 8 * p * v - 8 * h * s * \cos [f] - 8 * p * s * \cos [f] - 8 * s * v * \cos [f] + \\ & 8 * p^2 * \tan [b] + 8 * v^2 * \tan [b] - 8 * h * p * \tan [b] - 8 * h * v * \tan [b] + \\ & 16 * p * v * \tan [b] - 8 * h * s * \cos [f] * \tan [b] + 8 * p * s * \cos [f] * \tan [b] + \end{aligned}$$

```

8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))),
w->(1/(2*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4)))*
(-8*h*Tan[b]^2*n^2+8*p*Tan[b]^2*n^2+8*v*Tan[b]^2*n^2+8*p*n^2+
8*v*n^2+8*h*Tan[b]^2-8*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+8*h+
8*s*Cos[f]+Sqrt[(8*h*Tan[b]^2*n^2-8*p*Tan[b]^2*n^2-
8*v*Tan[b]^2*n^2-8*p*n^2-8*v*n^2-8*h*Tan[b]^2+
8*p*Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2-8*h-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-
8*p*Tan[b]-8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b])^2-
4*(4*Tan[b]^2*n^2+4*n^2-4*Tan[b]^2-4))*(-5*d^2-8*p*d-4*s*d-
8*v*d-8*s*Cos[f]*d-8*h*Tan[b]*d+8*p*Tan[b]*d+8*v*Tan[b]*d-
4*h^2+4*n^2*p^2-4*p^2-4*s^2+4*n^2*v^2-4*v^2-
8*s^2*Cos[f]^2-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+
4*n^2*p^2*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2-
4*v^2*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-
8*h*n^2*v*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-
8*p*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v-8*p*v-8*h*s*Cos[f]-8*p*s*Cos[f]-
8*s*v*Cos[f]+8*p^2*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]-8*h*p*Tan[b]-
8*h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+
8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+8*s*v*Cos[f]*Tan[b]))+8*d*Tan[b]+
8*p*Tan[b]+8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b]))}

l[p_,v_,s_,d_,h_,n_,f_,b_]:=Sqrt[p^2+2*p*v+v^2+h^2*Tan[b]^2-
2*h*p*Tan[b]^2+p^2*Tan[b]^2-2*h*v*Tan[b]^2+2*p*v*Tan[b]^2+
v^2*Tan[b]^2-(1/(-4+4*n^2-4*Tan[b]^2+4*n^2*Tan[b]^2))*
(p*(8*h+8*n^2*p+8*n^2*v+8*s*Cos[f]+8*d*Tan[b]+8*p*Tan[b]+
8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b]+8*h*Tan[b]^2-8*h*n^2*Tan[b]^2-
8*p*Tan[b]^2+8*n^2*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+8*n^2*v*Tan[b]^2+
Sqrt[(-8*h-8*n^2*p-8*n^2*v-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-
8*p*Tan[b]-8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b]-8*h*Tan[b]^2+
8*h*n^2*Tan[b]^2+8*p*Tan[b]^2-8*n^2*p*Tan[b]^2+
8*v*Tan[b]^2-8*n^2*v*Tan[b]^2)^2-4*(-4+4*n^2-4*Tan[b]^2+
4*n^2*Tan[b]^2))*(-5*d^2-4*h^2-8*d*p-4*p^2+4*n^2*p^2-
4*d*s-4*s^2-8*d*v-8*p*v+8*n^2*p*v-4*v^2+4*n^2*v^2-
8*d*s*Cos[f]-8*h*s*Cos[f]-8*p*s*Cos[f]-8*s*v*Cos[f]-
8*s^2*Cos[f]^2-8*d*h*Tan[b]+8*d*p*Tan[b]-8*h*p*Tan[b]+
8*p^2*Tan[b]+8*d*v*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]+
8*v^2*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+
8*s*v*Cos[f]*Tan[b]-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+
8*h*p*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+
4*n^2*p^2*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2-8*h*n^2*v*Tan[b]^2-
8*p*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-4*v^2*Tan[b]^2+
4*n^2*v^2*Tan[b]^2)))-
(1/(-4+4*n^2-4*Tan[b]^2+4*n^2*Tan[b]^2))*
(v*(8*h+8*n^2*p+8*n^2*v+8*s*Cos[f]+8*d*Tan[b]+8*p*Tan[b]+
8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b]+8*h*Tan[b]^2-8*h*n^2*Tan[b]^2-
8*p*Tan[b]^2+8*n^2*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+8*n^2*v*Tan[b]^2+
Sqrt[(-8*h-8*n^2*p-8*n^2*v-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-
8*p*Tan[b]-8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b]-8*h*Tan[b]^2+
8*h*n^2*Tan[b]^2+8*p*Tan[b]^2-8*n^2*p*Tan[b]^2+
8*v*Tan[b]^2-8*n^2*v*Tan[b]^2)^2-4*(-4+4*n^2-4*Tan[b]^2+
4*n^2*Tan[b]^2))*(-5*d^2-4*h^2-8*d*p-4*p^2+4*n^2*p^2-
4*d*s-4*s^2-8*d*v-8*p*v+8*n^2*p*v-4*v^2+4*n^2*v^2-
8*d*s*Cos[f]-8*h*s*Cos[f]-8*p*s*Cos[f]-8*s*v*Cos[f]-
8*s^2*Cos[f]^2-8*d*h*Tan[b]+8*d*p*Tan[b]-8*h*p*Tan[b]+
8*p^2*Tan[b]+8*d*v*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]+
8*v^2*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+
8*s*v*Cos[f]*Tan[b]-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+
8*h*p*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+
4*n^2*p^2*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2-8*h*n^2*v*Tan[b]^2-
8*p*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-4*v^2*Tan[b]^2+
4*n^2*v^2*Tan[b]^2)))+

```

$$\begin{aligned}
& (1/(-4+4*n^2-4*\tan[b]^2+4*n^2*\tan[b]^2)) * \\
& (h*\tan[b]^2*(8*h+8*n^2*p+8*n^2*v+8*s*\cos[f]+8*d*\tan[b]+ \\
& 8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]+8*h*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2+8*n^2*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*n^2*v*\tan[b]^2+\sqrt{(-8*h-8*n^2*p-8*n^2*v-8*s*\cos[f]- \\
& 8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b]- \\
& 8*h*\tan[b]^2+8*h*n^2*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2- \\
& 8*n^2*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*n^2*v*\tan[b]^2)^2- \\
& 4*(-4+4*n^2-4*\tan[b]^2+4*n^2*\tan[b]^2))*(-5*d^2-4*h^2- \\
& 8*d*p-4*p^2+4*n^2*p^2-4*d*s-4*s^2-8*d*v-8*p*v+ \\
& 8*n^2*p*v-4*v^2+4*n^2*v^2-8*d*s*\cos[f]-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]-8*s^2*\cos[f]^2-8*d*h*\tan[b]+ \\
& 8*d*p*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]+8*p^2*\tan[b]+8*d*v*\tan[b]- \\
& 8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*s*\cos[f]*\tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]- \\
& 4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*p*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*p^2*\tan[b]^2+ \\
& 8*h*v*\tan[b]^2-8*h*n^2*v*\tan[b]^2-8*p*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*n^2*p*v*\tan[b]^2-4*v^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2)))- \\
& (1/(-4+4*n^2-4*\tan[b]^2+4*n^2*\tan[b]^2)) * \\
& (p*\tan[b]^2*(8*h+8*n^2*p+8*n^2*v+8*s*\cos[f]+8*d*\tan[b]+ \\
& 8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]+8*h*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2+8*n^2*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*n^2*v*\tan[b]^2+\sqrt{(-8*h-8*n^2*p-8*n^2*v-8*s*\cos[f]- \\
& 8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b]- \\
& 8*h*\tan[b]^2+8*h*n^2*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2- \\
& 8*n^2*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*n^2*v*\tan[b]^2)^2- \\
& 4*(-4+4*n^2-4*\tan[b]^2+4*n^2*\tan[b]^2))*(-5*d^2-4*h^2- \\
& 8*d*p-4*p^2+4*n^2*p^2-4*d*s-4*s^2-8*d*v-8*p*v+ \\
& 8*n^2*p*v-4*v^2+4*n^2*v^2-8*d*s*\cos[f]-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]-8*s^2*\cos[f]^2-8*d*h*\tan[b]+ \\
& 8*d*p*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]+8*p^2*\tan[b]+8*d*v*\tan[b]- \\
& 8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*s*\cos[f]*\tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]- \\
& 4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*p*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*p^2*\tan[b]^2+ \\
& 8*h*v*\tan[b]^2-8*h*n^2*v*\tan[b]^2-8*p*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*n^2*p*v*\tan[b]^2-4*v^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2)))- \\
& (1/(-4+4*n^2-4*\tan[b]^2+4*n^2*\tan[b]^2)) * \\
& (v*\tan[b]^2*(8*h+8*n^2*p+8*n^2*v+8*s*\cos[f]+8*d*\tan[b]+ \\
& 8*p*\tan[b]+8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]+8*h*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*\tan[b]^2-8*p*\tan[b]^2+8*n^2*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*n^2*v*\tan[b]^2+\sqrt{(-8*h-8*n^2*p-8*n^2*v-8*s*\cos[f]- \\
& 8*d*\tan[b]-8*p*\tan[b]-8*v*\tan[b]-8*s*\cos[f]*\tan[b]- \\
& 8*h*\tan[b]^2+8*h*n^2*\tan[b]^2+8*p*\tan[b]^2- \\
& 8*n^2*p*\tan[b]^2+8*v*\tan[b]^2-8*n^2*v*\tan[b]^2)^2- \\
& 4*(-4+4*n^2-4*\tan[b]^2+4*n^2*\tan[b]^2))*(-5*d^2-4*h^2- \\
& 8*d*p-4*p^2+4*n^2*p^2-4*d*s-4*s^2-8*d*v-8*p*v+ \\
& 8*n^2*p*v-4*v^2+4*n^2*v^2-8*d*s*\cos[f]-8*h*s*\cos[f]- \\
& 8*p*s*\cos[f]-8*s*v*\cos[f]-8*s^2*\cos[f]^2-8*d*h*\tan[b]+ \\
& 8*d*p*\tan[b]-8*h*p*\tan[b]+8*p^2*\tan[b]+8*d*v*\tan[b]- \\
& 8*h*v*\tan[b]+16*p*v*\tan[b]+8*v^2*\tan[b]- \\
& 8*h*s*\cos[f]*\tan[b]+8*p*s*\cos[f]*\tan[b]+8*s*v*\cos[f]*\tan[b]- \\
& 4*h^2*\tan[b]^2+4*h^2*n^2*\tan[b]^2+8*h*p*\tan[b]^2- \\
& 8*h*n^2*p*\tan[b]^2-4*p^2*\tan[b]^2+4*n^2*p^2*\tan[b]^2+ \\
& 8*h*v*\tan[b]^2-8*h*n^2*v*\tan[b]^2-8*p*v*\tan[b]^2+ \\
& 8*n^2*p*v*\tan[b]^2-4*v^2*\tan[b]^2+4*n^2*v^2*\tan[b]^2)))+ \\
& (1/(4*(-4+4*n^2-4*\tan[b]^2+4*n^2*\tan[b]^2)^2)) * \\
& (8*h+8*n^2*p+8*n^2*v+8*s*\cos[f]+8*d*\tan[b]+8*p*\tan[b]+ \\
& 8*v*\tan[b]+8*s*\cos[f]*\tan[b]+8*h*\tan[b]^2-8*h*n^2*\tan[b]^2- \\
& 8*p*\tan[b]^2+8*n^2*p*\tan[b]^2-8*v*\tan[b]^2+8*n^2*v*\tan[b]^2+
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Sqrt}[(-8h-8n^2p-8n^2v-8s\cos[f]-8d\tan[b]- \\ & 8p\tan[b]-8v\tan[b]-8s\cos[f]\tan[b]-8h\tan[b]^2+ \\ & 8h^2n^2\tan[b]^2+8p\tan[b]^2-8n^2p\tan[b]^2+ \\ & 8v\tan[b]^2-8n^2v\tan[b]^2)^2-4*(-4+4n^2-4\tan[b]^2+ \\ & 4n^2\tan[b]^2)*(-5d^2-4h^2-8dp-4p^2+4n^2p^2- \\ & 4ds-4s^2-8dv-8pv+8n^2pv-4v^2+4n^2v^2- \\ & 8ds\cos[f]-8hs\cos[f]-8ps\cos[f]-8sv\cos[f]- \\ & 8s^2\cos[f]^2-8dh\tan[b]+8dp\tan[b]-8hp\tan[b]+ \\ & 8p^2\tan[b]+8dv\tan[b]-8hv\tan[b]+16pv\tan[b]+ \\ & 8v^2\tan[b]-8hs\cos[f]\tan[b]+8ps\cos[f]\tan[b]+ \\ & 8sv\cos[f]\tan[b]-4h^2\tan[b]^2+4h^2n^2\tan[b]^2+ \\ & 8hp\tan[b]^2-8hn^2p\tan[b]^2-4p^2\tan[b]^2+ \\ & 4n^2p^2\tan[b]^2+8hv\tan[b]^2-8hn^2v\tan[b]^2- \\ & 8pv\tan[b]^2+8n^2pv\tan[b]^2-4v^2\tan[b]^2+ \\ & 4n^2v^2\tan[b]^2)]^2+ \\ & (1/(4*(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)^2))* \\ & (\tan[b]^2*(8h+8n^2p+8n^2v+8s\cos[f]+8d\tan[b]+ \\ & 8p\tan[b]+8v\tan[b]+8s\cos[f]\tan[b]+8h\tan[b]^2- \\ & 8h^2n^2\tan[b]^2-8p\tan[b]^2+8n^2p\tan[b]^2-8v\tan[b]^2+ \\ & 8n^2v\tan[b]^2+\text{Sqrt}[(-8h-8n^2p-8n^2v-8s\cos[f]- \\ & 8d\tan[b]-8p\tan[b]-8v\tan[b]-8s\cos[f]\tan[b]- \\ & 8h\tan[b]^2+8hn^2\tan[b]^2+8p\tan[b]^2- \\ & 8n^2p\tan[b]^2+8v\tan[b]^2-8n^2v\tan[b]^2)^2- \\ & 4*(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)*(-5d^2-4h^2- \\ & 8dp-4p^2+4n^2p^2-4ds-4s^2-8dv-8pv+ \\ & 8n^2pv-4v^2+4n^2v^2-8ds\cos[f]-8hs\cos[f]- \\ & 8ps\cos[f]-8sv\cos[f]-8s^2\cos[f]^2-8dh\tan[b]+ \\ & 8dp\tan[b]-8hp\tan[b]+8p^2\tan[b]+8dv\tan[b]- \\ & 8hv\tan[b]+16pv\tan[b]+8v^2\tan[b]-8hs\cos[f]* \\ & \tan[b]+8ps\cos[f]\tan[b]+8sv\cos[f]\tan[b]- \\ & 4h^2\tan[b]^2+4h^2n^2\tan[b]^2+8hp\tan[b]^2- \\ & 8hn^2p\tan[b]^2-4p^2\tan[b]^2+4n^2p^2\tan[b]^2+ \\ & 8hv\tan[b]^2-8hn^2v\tan[b]^2-8pv\tan[b]^2+ \\ & 8n^2pv\tan[b]^2-4v^2\tan[b]^2+4n^2v^2\tan[b]^2)]^2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & c[p, v, s, d, h, n, f, b] := \\ & (1/2)*(d+2s\cos[f]+2h\tan[b]-2p\tan[b]-2v\tan[b]+ \\ & (8h\tan[b])/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8n^2p\tan[b])/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8n^2v\tan[b])/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8s\cos[f]\tan[b])/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8d\tan[b]^2)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8p\tan[b]^2)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8v\tan[b]^2)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8s\cos[f]\tan[b]^2)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8h^2n^2\tan[b]^3)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)- \\ & (8hn^2p\tan[b]^3)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8n^2p^2\tan[b]^3)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)- \\ & (8vn^2p\tan[b]^3)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (8n^2v^2\tan[b]^3)/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2)+ \\ & (1/(-4+4n^2-4\tan[b]^2+4n^2\tan[b]^2))* \\ & (\tan[b]*\text{Sqrt}[(-8h-8n^2p-8n^2v-8s\cos[f]-8d\tan[b]- \\ & 8p\tan[b]-8v\tan[b]-8s\cos[f]\tan[b]-8h\tan[b]^2+ \\ & 8h^2n^2\tan[b]^2+8p\tan[b]^2-8n^2p\tan[b]^2+ \\ & 8v\tan[b]^2-8n^2v\tan[b]^2)^2-4*(-4+4n^2-4\tan[b]^2+ \\ & 4n^2\tan[b]^2)*(-5d^2-4h^2-8dp-4p^2+4n^2p^2- \\ & 4ds-4s^2-8dv-8pv+8n^2pv-4v^2+4n^2v^2- \\ & 8ds\cos[f]-8hs\cos[f]-8ps\cos[f]-8sv\cos[f]- \\ & 8s^2\cos[f]^2-8dh\tan[b]+8dp\tan[b]-8hp\tan[b]+ \\ & 8p^2\tan[b]+8dv\tan[b]-8hv\tan[b]+16pv\tan[b]+ \end{aligned}$$

```

8*v^2*Tan[b]-8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+
8*s*v*Cos[f]*Tan[b]-4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+
8*h*p*Tan[b]^2-8*h*n^2*p*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+
4*n^2*p^2*Tan[b]^2+8*h*v*Tan[b]^2-8*h*n^2*v*Tan[b]^2-
8*p*v*Tan[b]^2+8*n^2*p*v*Tan[b]^2-4*v^2*Tan[b]^2+
4*n^2*v^2*Tan[b]^2))));
w[p_,v_,s_,d_,h_,n_,f_,b_]:=
(1/(2*(-4+4*n^2-4*Tan[b]^2+4*n^2*Tan[b]^2))) *
(8*h+8*n^2*p+8*n^2*v+8*s*Cos[f]+8*d*Tan[b]+8*p*Tan[b]+
8*v*Tan[b]+8*s*Cos[f]*Tan[b]+8*h*Tan[b]^2-8*h*n^2*Tan[b]^2-
8*p*Tan[b]^2+8*n^2*p*Tan[b]^2-8*v*Tan[b]^2+8*n^2*v*Tan[b]^2+
Sqrt[(-8*h-8*n^2*p-8*n^2*v-8*s*Cos[f]-8*d*Tan[b]-8*p*Tan[b]-
8*v*Tan[b]-8*s*Cos[f]*Tan[b]-8*h*Tan[b]^2+8*h*n^2*Tan[b]^2+
8*p*Tan[b]^2-8*n^2*p*Tan[b]^2+8*v*Tan[b]^2-8*n^2*v*Tan[b]^2)^
2-4*(-4+4*n^2-4*Tan[b]^2+4*n^2*Tan[b]^2)] *
(-5*d^2-4*h^2-8*d*p-4*p^2+4*n^2*p^2-4*d*s-4*s^2-8*d*v-
8*p*v+8*n^2*p*v-4*v^2+4*n^2*v^2-8*d*s*Cos[f]-
8*h*s*Cos[f]-8*p*s*Cos[f]-8*s*v*Cos[f]-8*s^2*Cos[f]^2-
8*d*h*Tan[b]+8*d*p*Tan[b]-8*h*p*Tan[b]+8*p^2*Tan[b]+
8*d*v*Tan[b]-8*h*v*Tan[b]+16*p*v*Tan[b]+8*v^2*Tan[b]-
8*h*s*Cos[f]*Tan[b]+8*p*s*Cos[f]*Tan[b]+8*s*v*Cos[f]*Tan[b]-
4*h^2*Tan[b]^2+4*h^2*n^2*Tan[b]^2+8*h*p*Tan[b]^2-
8*h*n^2*p*Tan[b]^2-4*p^2*Tan[b]^2+4*n^2*p^2*Tan[b]^2+
8*h*v*Tan[b]^2-8*h*n^2*v*Tan[b]^2-8*p*v*Tan[b]^2+
8*n^2*p*v*Tan[b]^2-4*v^2*Tan[b]^2+4*n^2*v^2*Tan[b]^2))];

```

```

p:=100;v:=150;s:=50;d:=400;h:=300;n:=1.5;f:=45*(Pi/180);b:=5*(Pi/180);

```

```

l[p,v,s,d,h,n,f,b]
1509.56

```

```

c[p,v,s,d,h,n,f,b]
392.95

```

```

w[p,v,s,d,h,n,f,b]
1751.31

```