

**Міністерство освіти і науки України
Житомирський державний технологічний університет**

**В.А. Кирилович
Р.С. Моргунов
Л.В. Дімітров
П.П. Мельничук**

**Передові технології
в автоматизованому виробництві.
Практикум**

Навчально-методичний посібник для практичних занять
з курсу “Передові технології в автоматизованому виробництві”
студентів спеціальності 151
“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

Житомир
2016

УДК 658.52.011.56:658.512.4 (075)
ББК 32.965я7
П27

*Рекомендовано до друку Вченою Радою
Житомирського державного технологічного університету
(протокол № 3 від 24 червня 2016 р.)*

Рецензенти:

Пасічник В.А. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри “Інтегровані технології машинобудування” Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”

Грабар І.Г. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри “Процеси, машини і обладнання” Житомирського національного агроєкологічного університету

Подчашинський Ю.О. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри “Комп’ютеризовані системи управління та автоматики” Житомирського державного технологічного університету

П27 **Передові** технології в автоматизованому виробництві.
Практикум : навч.-метод. посібник / В.А. Кирилович, Р.С. Моргунов, Л.В. Дімітров, П.П. Мельничук ; за заг. ред. В.А. Кириловича. – Житомир : ЖДТУ, 2016. – 144 с.
ISBN

Навчально-методичний посібник підготовлено міжнародним колективом авторів відповідно до навчального плану спеціальності “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” підготовки спеціалістів та магістрів в ЖДТУ. В основу покладена методично обґрунтована та програмно реалізована авторська методика автоматизованого формування безколізійних (без зіткнень, без аварій) траєкторій переміщення технологічного роботизованого комплексу при реалізації роботизованих механоскладальних технологій (РМСТ) в гнучких виробничих комірках (ГВК).

Посібник призначений для студентів усіх форм навчання даної спеціальності і може бути корисним аспірантам та інженерно-технічним працівникам, які займаються проблемами РМСТ машино- та приладобудування.

УДК 658.52.011.56:658.512.4
ББК 32.965я7

ISBN

© В.А. Кирилович, 2016
© Р.С. Моргунов, 2016
© Л.В. Дімітров, 2016
© П.П. Мельничук, 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
1. Короткі теоретичні відомості про технологічну взаємодію схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання	8
2. Рекурсивний метод Ньютона–Ейлера для розв'язування прямих задач динаміки промислових роботів.....	14
3. Короткі теоретичні відомості про теорію кватерніонів	17
4. Формування інформаційних моделей елементів ГВК.....	21
4.1. Особливості інформаційних моделей елементів ГВК	21
4.2. Інформаційні моделі маніпуляційних систем промислових роботів	24
4.3. ІМ схватів промислових роботів	28
4.4. ІМ об'єктів маніпулювання.....	32
4.5. ІМ технологічного обладнання.....	34
4.6. ІМ пристосувань технологічного обладнання.....	35
5. Методика формування безколізійних траєкторій	37
6. Програмний продукт “Robix”	40
6.1. Структура розробленого програмного продукту “Robix”	40
6.2. Основні можливості та системні вимоги розробленого програмного продукту “Robix”	42
6.3. Опис інтерфейсу програмного продукту “Robix”	43
6.4. Інструкція користувача щодо формування ІМ складових ГВК	48
6.4.1. Формування ІМ ПР мод. KUKA KR-30.....	48
6.4.1.1. Загальна інформація.....	48
6.4.1.2. Опис ланки 1 МС ПР мод. KUKA KR-30	49
6.4.1.3. Опис ланки 2 МС ПР мод. KUKA KR-30	50
6.4.1.4. Опис ланки 3 МС ПР мод. KUKA KR-30	52
6.4.1.5. Опис ланки 4 МС ПР мод. KUKA KR-30	54
6.4.1.6. Опис ланки 5 МС ПР мод. KUKA KR-30	57
6.4.1.7. Опис ланки 6 МС ПР мод. KUKA KR-30	60
6.4.1.8. Опис ланки 7 МС ПР мод. KUKA KR-30	62
6.4.1.9. Опис ланки 8 МС ПР мод. KUKA KR-30	66

6.4.1.10. Опис ланки 9 МС ПР мод. KUKA KR-30	68
6.4.2. Формування ІМ Сх мод. Schunk LGR 32.....	71
6.4.2.1. Загальна інформація	71
6.4.2.2. Опис точки кріплення СхПР до МС ПР	71
6.4.2.3. Опис елементів групи С Сх ПР	73
6.4.2.4. Опис елементів групи V1 СхПР	74
6.4.2.5. Опис елементів групи V2 Сх ПР	80
6.4.3. Формування ІМ ДТО РП ₁	87
6.4.3.1. Загальна інформація	87
6.4.3.2. Опис початку СК ДТО в СК ПР	88
6.4.3.3. Опис елементів групи С ДТО	88
6.4.4. Формування ІМ ПрРП ₁	93
6.4.4.1. Загальна інформація	93
6.4.4.2. Опис початку СК Пр РП в СК ТО	93
6.4.4.3. Опис елементів групи С Пр РП	94
6.4.5. Формування ІМ ОМ РП ₁	101
6.4.5.1. Загальна інформація	101
6.4.5.2. Опис початку СК ОМ в СК Пр РП.....	101
6.4.5.3. Опис елементів групи С ОМ.....	102
6.4.6. Формування ІМ ОТО РП ₂	104
6.4.6.1. Загальна інформація	104
6.4.6.2. Опис початку СК ОТО в СК ПР	105
6.4.6.3. Опис елементів групи С ОТО.....	106
6.4.7. Формування ІМ Пр РП ₂	111
6.4.7.1. Загальна інформація	111
6.4.7.2. Опис початку СК Пр РП в СК ТО.....	111
6.4.7.3. Опис елементів групи С Пр РП	112
6.4.7.4. Опис елементів групи V1 Пр РП.....	113
6.4.7.5. Опис елементів групи V2 Пр РП.....	116
6.4.7.6. Опис елементів групи V3 Пр РП.....	120
6.4.8. Формування ІМ перепон.....	125

6.4.8.2. Опис перепони в СК ПР	125
7. Порядок виконання роботи.....	126
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ	134

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

АС	–	автоматизований синтез
ГВК	–	гнучка виробнича комірка
ГВС	–	гнучка виробнича система
ГП	–	геометричний примітив
ДТО	–	допоміжне технологічне обладнання
ЗЗД	–	зворотна задача динаміки
ЗЗК	–	зворотна задача кінематики
ІМ	–	інформаційна модель
КПС	–	кутові параметри сервісу
КТЗ	–	координати точки затиску
ЛПС	–	лінійні параметри сервісу
МС	–	маніпуляційна система
ОМ	–	об'єкт маніпулювання
ОТО	–	основне технологічне обладнання
ПЗК	–	пряма задача кінематики
ПР	–	промисловий робот
Пр	–	пристосування
РМСТ	–	роботизована механоскладальна технологія
РП	–	робоча позиція
СК	–	система координат
Сх	–	схват
ТВ	–	технологічна взаємодія
ТО	–	технологічне обладнання
ТРК	–	технологічний роботизованих комплект
УК	–	узагальнена координата
ЧПУ	–	числове програмне управління

ВСТУП

Гнучкі виробничі комірки (ГВК) як складові гнучких комп'ютерно-інтегрованих систем, що на сьогодні розглядаються як передові та перспективні організаційно-виробничі форми гнучкого виробництва, є елементарними технологічними структурами, які функціонують за активної участі таких універсальних технічних засобів виробничої автоматизації, якими є промислові роботи (ПР). Технологічно обслуговуючи робочі позиції (РП) ГВК (завантажують, розвантажують, перевстановлюють, транспортують об'єкти маніпулювання (ОМ) між РП), ПР реалізують роботизовані механоскладальні технології (РМСТ) в ГВК. Однією з складових РМСТ є траєкторії переміщення схвата (Сх) ПР з/без ОМ в ньому, що є технологічним роботизованим комплектом (ТРК) певного складу. Траєкторії можуть бути згенеровані оптимальними за різними критеріями, а саме: швидкодії, величин крутних моментів в зчленуваннях ланок маніпуляційної системи (МС) ПР, енергоємності траєкторних переміщень тощо.

У навчально-методичному посібнику представлені методичні матеріали для виконання практичних та / або лабораторних робіт (залежно від вимог навчального плану підготовки магістрів та спеціалістів спеціальності “Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології”), зміст яких відповідає терміну “передові” як частини назви навчальної дисципліни “Передові технології в автоматизованому виробництві”. Матеріали є новими та оригінальними в науковому та методичному аспекті і розроблені як результат творчої співпраці вчених Житомирського державного технологічного університету (Україна) та технічного університету Софія (Республіка Болгарія). Зміст викладеного належить до автоматизованого формування безколізійних траєкторій (як складових РМСТ) переміщення технологічного роботизованого комплекту, тобто до розв'язування траєкторних задач при автоматизованому синтезі РМСТ в ГВК.

Основою вихідних даних, що подані в посібнику, є результати виконання студентами курсового проекту з навчальної дисципліни “Обладнання, технологія і автоматизація дискретного виробництва” з певним уточненням відповідними даними індивідуальних завдань за рахунок введення штучних перепон при відпрацюванні траєкторії переміщення схвата ПР та за умови комплектації ПР контурною системою ЧПУ.

Можливі інші постановки задач, зміст яких повинен відповідати тим задачам, що розглядаються в даному навчально-методичному посібнику

1. Короткі теоретичні відомості про технологічну взаємодію схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання

Технологічна взаємодія (ТВ) Сх ПР з ОМ в контексті змісту автоматизованого синтезу (АС) РМСТ розглядається як певна передісторія (підготовчі дії) і безпосередньо взаємодія (механічний контакт різного фізичного походження) між поверхнями ОМ, який попередньо встановлений (збазований та закріплений) або повинен бути таким, в Пр основного (ОТВ) та / або допоміжного (ДТО) технологічного обладнання і затискними елементами Сх ПР, а також технологічно обумовлених наступних траєкторних переміщень так званого технологічного роботизованого комплексу (ТРК).

Склад ТРК визначається змістом роботизованих технологічних операцій і переходів і може складатися з Сх і закріпленого в ньому ОМ або без нього (важливо при міжагрегатних переміщеннях ТРК), Сх з ОМ і Пр ТО (важливо при визначенні технологічних параметрів сервісу при роботизованих технологічних переходах розвантаження / завантаження РП) або "порожнього" Сх (важливо при "холостих" переміщеннях Сх між РП ГВК), тобто з таких складових ГВК, як Сх (як частина ПР), ОМ, Пр (як частина РП) в різних їх поєднаннях.

Таким чином, ТВ Сх з ОМ виникає і тому є невід'ємною частиною реалізації роботизованих траєкторій як складових РМСТ.

Синтез РМСТ – складний та апіорі неоднозначний процес, в якому аналізуються і обробляються дані про елементи ГВК, отримані на попередніх етапах проектування ГВК. Під час синтезу РМСТ розв'язуються такі завдання як розміщення та орієнтації РП в СК ПР, знаходження оптимальних траєкторій переміщення Сх ПР, вибір поверхонь та координат точок затиску ОМ в Сх ПР, визначення векторів і орієнтації Сх при підході / відході Сх до / від ОМ, що встановлений в Пр РП .

Тому доцільно розглядати технологічну взаємодію Сх ПР з ОМ у *вузькому сенсі* з урахуванням можливих векторів підходу / відходу Сх ПР до / від ОМ, орієнтації Сх в СК ПР і з урахуванням умови мінімізації $P_{Gr}G_{OM_i} \rightarrow \min$, що в ідеалі повинно бути $P_{Gr}G_{OM_i} = 0$, де P_{Gr} – полюс схвата ПР, а в контексті даної проблеми – його координати в СК $OM_i^{d_s}$; G_{OM_i} – вага dg -го ОМ після t -ої РП ($OM_i^{d_s}$), а в контексті даної проблеми – координати центра ваги $OM_i^{d_s}$ в СК $OM_i^{d_s}$.

При розгляді поняття ТВ Сх ПР з ОМ в *широкому сенсі* досліджуються параметри траєкторних переміщень Сх, що визначаються на множині параметрів ТВ у вузькому сенсі, генерується множина траєкторій та вибирається оптимальна за попередньо обраним користувачем критерієм оптимальності.

Технологічна взаємодія Сх ПР з ОМ є поняттям комплексним, інтегрованим і його пропонується розглядати як таке, що характеризується наступними показниками:

1. векторно-проекційні (технологічні параметри сервісу ТПС);
2. геометрично-силові (відстань між точками P_{Gr} та G_{OM_i});
3. траєкторно-динамічні (траєкторія переміщення Сх ПР в зону / із зони обслуговування кожної РП ГВК).

При АС РМСТ, особливо при визначенні ТПС, необхідною є інформація щодо факторів, які безпосередньо впливають на технологічну взаємодію Сх ПР з ОМ та які необхідно враховувати при виборі оптимального варіанту положення, орієнтації, траєкторії переміщення Сх до / від ОМ для технологічного обслуговування РП.

До таких факторів належать (див. рис. 1.1):

- *параметри ОМ*: розміри, форма, фізико-механічні властивості матеріалу, якості та значення шорсткості поверхонь, множина упорядкованих елементарних поверхонь внутрішнього та зовнішнього контурів, координати центру ваги в системі координат ОМ, координати положення та орієнтація ОМ в Пр РП, технологічні параметри сервісу ОМ в ПР;

- *параметри Пр РП*: розміри, форма, поверхні контактування з ОМ даної РП, зона заборони, зона обслуговування, положення та орієнтація в системі координат РП, технологічні параметри сервісу при розвантаженні/завантаженні РП;

- *параметри РП*: зона заборони, зона обслуговування, робочий простір, геометричні параметри обладнання, що є РП;

- *параметри МС ПР*: кількість ланок МС, розміри ланок МС, величини переміщень кожної з ланок, варіанти положень ланок при обслуговуванні РП, система координат, кількість ступенів рухомості;

- *параметри Сх ПР*: розміри, форма, геометричні параметри Сх у випадку повного розтиску / пустого затиску, зона заборони затискних елементів в системі координат Сх, зона обслуговування затискних елементів в системі координат Сх, фізичний принцип затиску ОМ, координати полюса Сх ПР в СК Сх / ПР;

- *технологічний маршрут* обробки ОМ (на прикладі металообробки різанням): кількість технологічних РП, кількість фізичних РП, розташування ТО РП в СК ПР, послідовність обслуговування ПР РП, тривалість обробки ОМ на РП, форма та розміри ОМ, послідовність технологічної дії на ОМ.

-

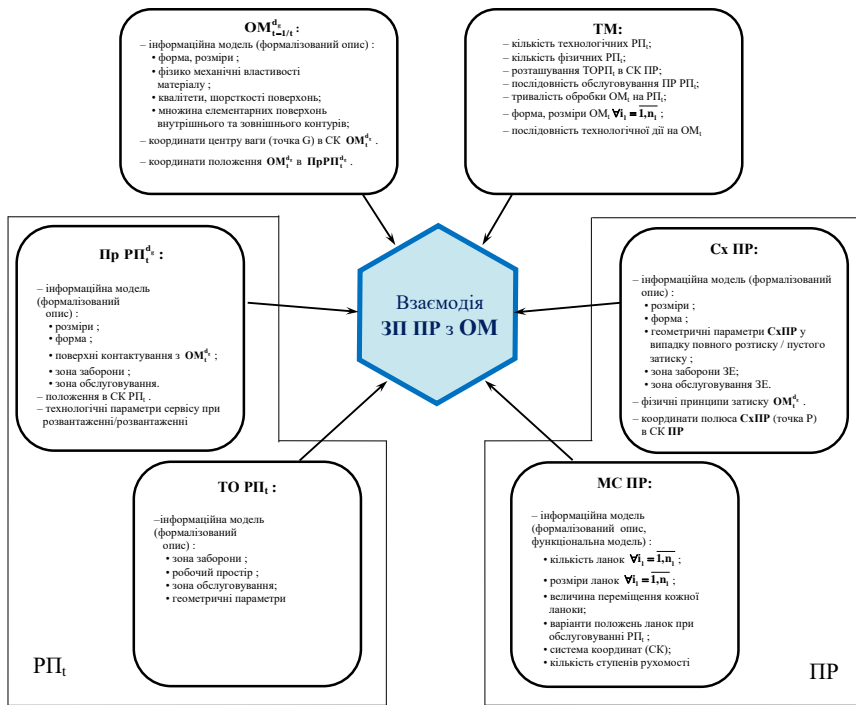


Рис. 1.1. Фактори, що впливають на ТВ Сх ПР з ОМ

Визначення параметрів ТВ Сх ПР з ОМ пов'язане із: вибором поверхонь затиску ОМ в Сх; орієнтації Сх при ТВ; траєкторії підходу / відходу Сх з / без $OM_{t-1}^{d_s}$ до / від PP_t при її завантаженні та підходу / відходу Сх без / з $OM_t^{d_s}$ до / від PP_t при її розвантаженні.

Основний критерій, що широко описаний в інформаційних джерелах і за яким розраховується геометрично-силові параметри ТВ – найменша відстань між полюсом Сх (P_{Gr}) та центром мас $OM_t^{d_s}$ (G_{OM_t}), що в свою чергу суттєво впливає на розрахунки інших складових ТВ. При цьому можливими є варіанти:

- рухомості ТРК складу ($OM_t^{d_s} \wedge PP_t^{d_s}$) (рухомий, нерухомий), що значно ускладнює технологічну операцію розвантаження PP_t ;
- рухомості $PP_t^{d_s}$ (рухоме, нерухоме), що значно ускладнює технологічну операцію роботизованого встановлення ТРК (Сх із закріпленням в ньому $OM_{t-1}^{d_s}$) в $PP_t^{d_s}$, тобто завантаження $OM_t^{d_s}$ в PP_t .

Найбільш поширеним, але не достатньо дослідженим, є варіант ТВ Сх з нерухомим OM_t^{dg} , що займає певне положення (орієнтація, координати), наприклад, в призмі – $Pr_t^{d_s}$ (див. рис. 1.2).

При розвантаженні PP_t (рис. 1.2) Сх може технологічно взаємодіяти з $OM_t^{d_s}$ шляхом накладання векторно-проекційних зв'язків, переміщуючись горизонтально зліва та справа вздовж осі $OM_t^{d_s}$, реалізуючи один із параметрів $ТПС_t$ – технологічний вектор підходу відповідно лівий ($ТВП_t^{TL}$) та правий ($ТВП_t^{TR}$). Після встановлення $OM_t^{d_s}$ в $Pr_t^{d_s}$ Сх може розірвати вказані векторно-проекційні зв'язки за рахунок виконання зворотніх рухів вздовж технологічного вектора відходу – відповідно $ТВВ_t^{TL}$ та $ТВВ_t^{TR}$. Очевидно, що відповідні $ТВП_t$ та $ТВВ_t$ схват може виконати за різної його (Сх) орієнтації відносно $OM_t^{d_s}$, що для лівого і правого торців даного $OM_t^{d_s}$ визначається технологічними кутами сервісу ($ТКС_t$), які є складовими $ТПС_t$ і які на рисунку 1.3 позначені як $ТКП_t^{TL}$ та $ТКП_t^{TR}$ відповідно. Після встановлення $OM_t^{d_s}$ в $Pr_t^{d_s}$ Сх повинен виконати рухи зняття (розірвання) векторно-проекційних зв'язків з $OM_t^{d_s}$ в напрямках та з параметрами, що є протилежними вказаним і можуть виконуватись в межах відповідних кутів сервісу відведення – $ТКВ_t^{TL}$ та $ТКВ_t^{TR}$.

Всі наведені параметри $ТПС_t$, а саме $ТВП_t^{TL}$, $ТВП_t^{TR}$, $ТВВ_t^{TL}$, $ТВВ_t^{TR}$, $ТКП_t^{TL}$, $ТКП_t^{TR}$, $ТКВ_t^{TL}$, $ТКВ_t^{TR}$ містять верхній індекс “Т”, який означає технологічний тип Сх – торцевий, що визначений переміщенням Сх відносно торця $OM_t^{d_s}$.

Розглядаючи $ТПС_t$ при відносному боковому, тобто перпендикулярно осі $OM_t^{d_s}$, переміщенні Сх можна сформуванати аналогічні $ТПС_t$ для бокового (Б – верхній індекс із відповідних позначеннях) Сх, а саме $ТВП_t^{BL}$, $ТВП_t^{BR}$, $ТВВ_t^{BL}$, $ТВВ_t^{BR}$, $ТКП_t^{BL}$, $ТКП_t^{BR}$, $ТКВ_t^{BL}$, $ТКВ_t^{BR}$ (рис. 1.3).

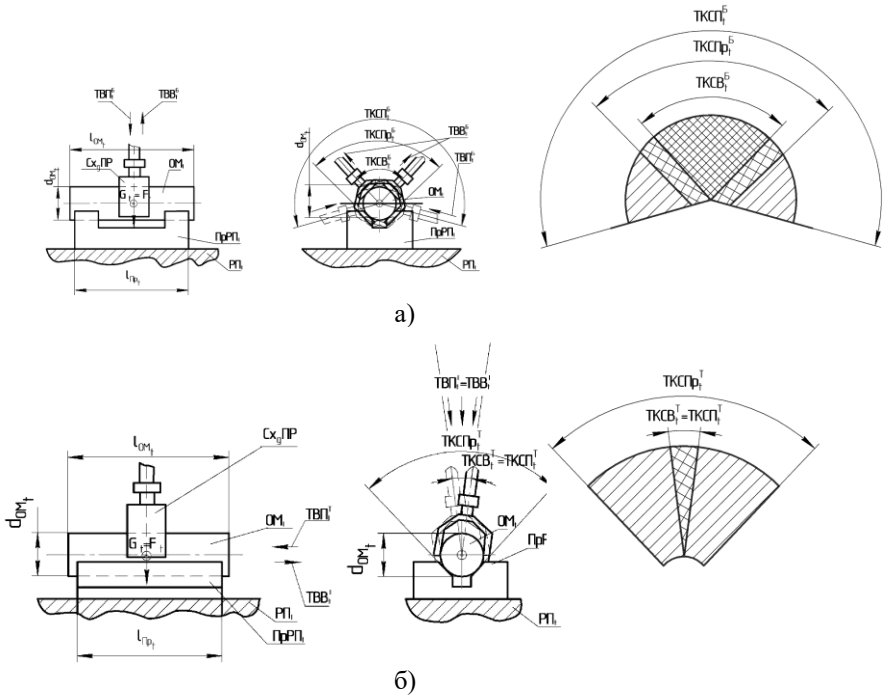


Рис. 1.2. Приклади графічної ілюстрації поняття ТПС та його параметрів при підході Сх до ОМ за траєкторією, що: а – перпендикулярна осі ОМ; б – співвісна з віссю ОМ

Як видно із викладеного, тільки в одному випадку для бокового схвату його полюс P_{Gr} геометрично співпадає з точкою зосередження ваги $OM_i^{d_s}$ – т. G_{OM_i} , де і виконується затиск $OM_i^{d_s}$ в Сх (точки P_{Gra} та G_{OM_i} співпадають). З позицій геометрично-силової складової ТВ цей випадок є ідеальним. Для розглянутих випадків торцевого Сх така ситуація, тобто $P_{Gr}G_{O_i} = 0$, взагалі неможлива в зв'язку з перетинами (колізіями, зіткненнями), що визначені конструктивними елементами $Pr_i^{d_s}$, в даному випадку призому, при осьовому переміщенні Сх за $ТВП_i^{TL}, ТВП_i^{TR}$ та TBB_i^{TL}, TBB_i^{TR} .

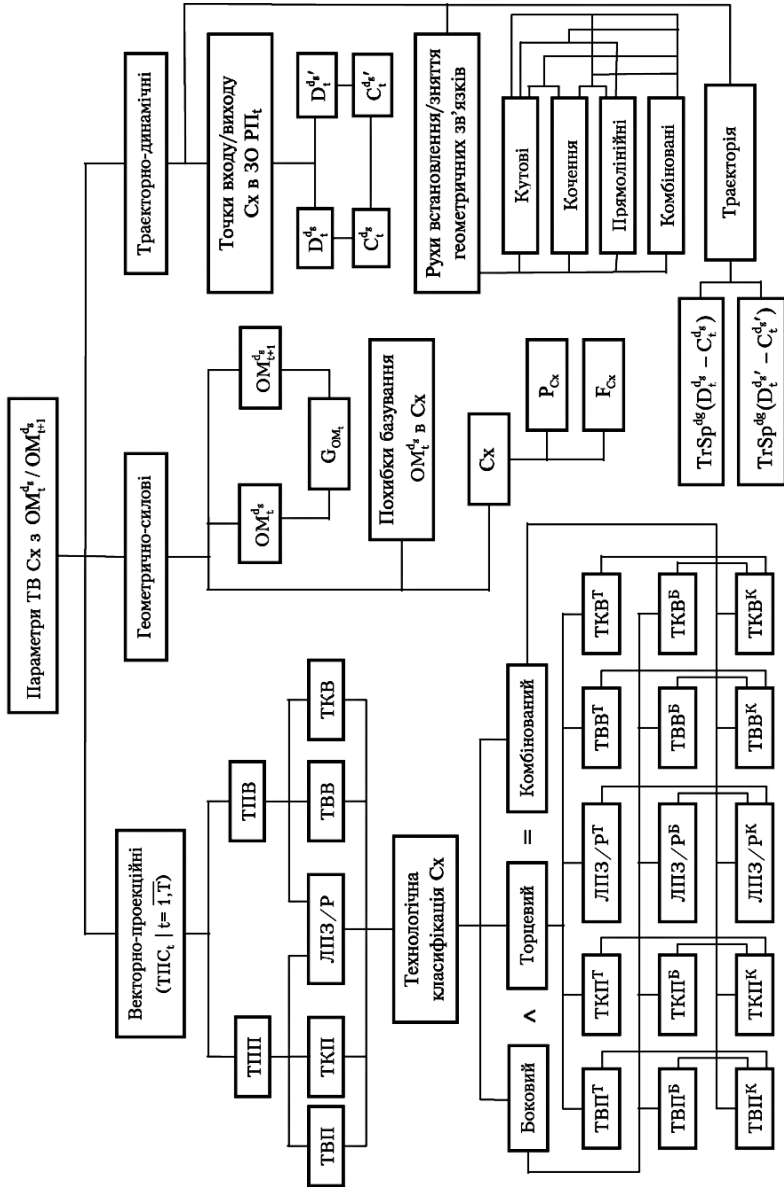


Рис. 1.3. Узагальнена структурна схема складових параметрів ТВ у вузькому сенсі

Крім того, точка затиску $OM_t^{d_s}$ в Сх – т. F – і при торцевому, і при боковому Сх не є чітко фіксованою і визначається співвідношенням конструктивно-геометричних параметрів $OM_t^{d_s}$, його положенням та координатами в $Pr_t^{d_s}$, положенням та координатами самого $Pr_t^{d_s}$ в СК ТО, а також координатами та орієнтацією Сх. Це дає можливість визначити іншу складову $ТПС_t$, яка названа лінійним параметром затиску/розтиску і яка на рис. 1.3 позначена відповідно $ЛПЗ/P^{TL} = ЛПЗ/P^{BL}$, $ЛПЗ/P^{TR} = ЛПЗ/P^{BR}$ та $ЛПЗ/P^{BM}$, де M означає середню зону (від. англ. middle – середина) між базувальними елементами призми.

За умови виконання Сх функцій як бокового так і торцевого, Сх називається комбінованим (К).

Таким чином, аналіз наведеного прикладу вказує на те, що тільки співвідношення розмірів та сумісний аналіз конструктивно-геометричних параметрів таких складових ТРК як $Pr_t^{d_s}$, $OM_t^{d_s}$ та Сх є визначальним при класифікації Сх на Т, Б та К. Доцільно наголосити, що один і той же Сх на різних $РП_t / t = \overline{1, T}$ може бути класифікований по-різному. Крім того, в залежності від положення $OM_t^{d_s}$ в $Pr_t^{d_s}$ (розташування, координати), тобто в межах однієї t -ої РП, Сх також може бути класифікований по-різному.

Викладене вище дає можливість графово представити складові ТВ Сх з ОМ в ГВК та їх (складових ТВ) параметри (рис. 1.3).

2. Рекурсивний метод Ньютона–Ейлера для розв’язування прямих задач динаміки промислових роботів

Пряма задача динаміки (ПЗД) дозволяє визначити необхідні значення моментів (сил), які слід прикласти в шарнірах кожної ланки МС ПР для реалізації руху ланок МС ПР.

Відомо три основних підходи, що дозволяють отримати множину взаємопов’язаних нелінійних диференційних рівнянь, які описують динаміку МС ПР:

- 1) представлення динаміки методом зв’язаних графів;
- 2) представлення динаміки методом Ньютона–Ейлера;
- 3) представлення динаміки методом Лагранжа–Ейлера.

Представлення зв’язаними графами передбачає наявність потоків енергії та інформації із одної ланки в іншу. Зв’язані графи – це представлення рисунком, на якому зображуються відповідними позначками

потоки енергії та активні зв'язки (управління). Кожний зв'язок має відповідне зусилля та потік.

Метод Ньютона–Ейлера використовується для розрахунку узагальнених сил (моментів), необхідних для отримання заданої траєкторії ПР, базується на використанні рівнянь сили Ньютона та рівнянні пошуку моменту Ейлера.

Метод Лагранжа–Ейлера дозволяє отримати рівняння динаміки на базі описаної кінематики МС ПР за допомогою матричного метода Денавіта–Хартенберга.

Слід зазначити, що рівняння Ньютона–Ейлера набагато ефективніше, ніж рівняння Лагранжа–Ейлера під час цифрових розрахунків. Так, наприклад, для ПР з кількістю ступенів рухомості $n = 6$, час розрахунків при використанні рівнянь Лагранжа–Ейлера буде на 2 порядки більше, ніж при використанні рівнянь Ньютона–Ейлера.

На додаток до згаданого вище також відомими є рекурсивний метод Ньютона–Ейлера та рекурсивний метод Лагранжа. Ці альтернативні підходи дозволяють суттєво зменшити кількість обчислень. Ефективність цих методів базується на сукупності рекурентних зв'язків між швидкостями, прискореннями і узагальненими силами.

Для пошуку траєкторно-динамічної складової ТВ доцільно використати рекурсивний метод Ньютона–Ейлера. Нижче представлені формули пошуку моментів і сил для рухомої i -ої ланки МС ПР, де КЗ та ЛЗ – кутовий та лінійний тип руху ланки.

Кутова швидкість i -ої ланки:

$$[\omega_i]_i = \begin{cases} Q_{i-1}^T [\omega_{i-1}]_{i-1} + \dot{\theta}_i [e_i]_i, & : \text{КЗ} \\ Q_{i-1}^T [\omega_{i-1}]_{i-1}. & : \text{ЛЗ} \end{cases} \quad (2.1)$$

Кутове прискорення i -ої ланки:

$$[\dot{\omega}_i]_i = \begin{cases} Q_{i-1}^T [\dot{\omega}_{i-1}]_{i-1} + \ddot{\theta}_i [e_i]_i + \dot{\theta}_i [\omega_i]_i \times [e_i]_i, & : \text{КЗ} \\ Q_{i-1}^T [\dot{\omega}_{i-1}]_{i-1}. & : \text{ЛЗ} \end{cases} \quad (2.2)$$

Лінійна швидкість центру мас i -ої ланки:

$$[\dot{c}_i]_i = \begin{cases} Q_{i-1}^T ([\dot{c}_{i-1}]_{i-1} + [\omega_{i-1}]_{i-1} \times [r_{i-1}]_{i-1}) + [\omega_i]_i \times [d_i]_i, \\ Q_{i-1}^T ([\dot{c}_{i-1}]_{i-1} + [\omega_{i-1}]_{i-1} \times [r_{i-1}]_{i-1}) + [\omega_i]_i \times [d_i]_i + \dot{b}_i [e_i]_i, \end{cases} \quad : K3 \quad (2.3)$$

$$[d_i]_i = [a_i]_i - [r_i]_i.$$

Лінійне прискорення центру мас i -ої ланки:

$$[\ddot{c}_i]_i = \begin{cases} Q_{i-1}^T [\ddot{c}_{i-1} + \dot{\omega}_{i-1} \times r_{i-1} + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times r_{i-1})]_{i-1} + \\ \quad + [\dot{\omega}_i \times d_i + \omega_i \times (\omega_i \times d_i)]_i, \\ Q_{i-1}^T [\ddot{c}_{i-1} + \dot{\omega}_{i-1} \times r_{i-1} + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times r_{i-1})]_{i-1} + \\ \quad + [\dot{\omega}_i \times d_i + \omega_i \times (\omega_i \times d_i) + \ddot{b}_i e_i + \dot{b}_i \omega_i \times e_i]_i. \end{cases} \quad (2.4)$$

Крутий момент i -ої ланки:

$$\begin{aligned} [f_{i-1,i}]_i &= [f_i]_i + [f_{i,i+1}]_i - m_i [g]_i, \\ [n_{i-1,i}]_i &= [n_i]_i + [n_{i,i+1}]_i + [d_i]_i \times [f_{i-1,i}]_i + [r_i]_i \times [f_{i,i+1}]_i, \\ \tau_i &= \begin{cases} [e]_i^T [n_{i-1,i}]_i, \\ [e]_i^T [f_{i-1,i}]_i. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.5)$$

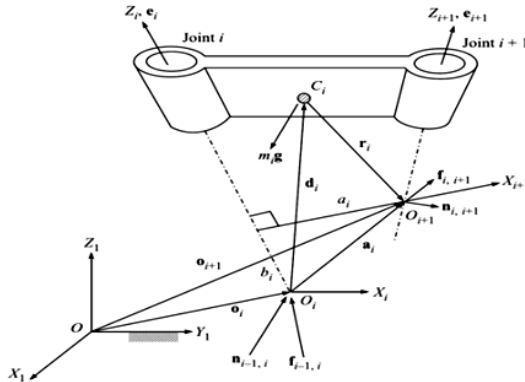


Рис. 2.1. Моменти і сили, що діють на i -ту ланку МС ПР

Пояснення до формул (2.1) – (2.5):

- $f_{i-1,i}$ – тримірний вектор результуючої сили, що діє на ланку i , ланкою $(i-1)$ в точці O_i ;
- $n_{i-1,i}$ – тримірний вектор результуючого моменту, що діє на ланку i ,

- ланкою $i-1$ в точці O_i ;
- $f_{i,i+1}$ – тримірний вектор результуючої сили, що діє на ланку i , ланкою $i+1$ в точці O_{i+1} . Зверніть увагу, що $f_{i+1,i} = -f_{i,i+1}$;
- $p_{i,i+1}$ – тримірний вектор результуючого моменту, що діє на ланку i , ланкою $i+1$ в точці O_{i+1} , також $p_{i+1,i} = -p_{i,i+1}$;
- g – тримірний вектор прискорення вільного падіння;
- p_i – результуючий момент, що діє на центр мас ланки i ;
- f_i – результуюча сила, що діє на центр мас ланки i ;
- I_i – матриця інерції i -ої ланки навколо центру мас C_i ;
- c_i – радіус-вектор центра мас i -ої ланки;
- r_i – радіус-вектор i -ої ланки, від центру мас C_i до точки O_{i+1} ;
- a_i – радіус-вектор i -ої ланки, від точки O_i до точки O_{i+1} ;
- \dot{c}_i, \ddot{c}_i – лінійна швидкість та прискорення центру мас i -ої ланки;
- $\omega_i, \dot{\omega}_i$ – кутова швидкість та прискорення i -ої ланки;
- e_i – одиничний вектор, навколо або вздовж якого здійснюється рух.

3. Короткі теоретичні відомості про теорію кватерніонів

Кватерніон – це впорядкована четвірка дійсних чисел s, a, b, c , які зв'язані з чотирма базисними елементами $1, i, j, k$ (рис 3.1), що мають такі властивості:

$$i^2 = j^2 = k^2 = -1; i \cdot j = k; j \cdot k = i; k \cdot i = j; j \cdot i = -k; k \cdot j = -i; i \cdot k = -j. \quad (3.1)$$

Операції додавання і віднімання кватерніонів визначені покомпонентно. Множення кватерніонів визначається законом множення їх уявних одиниць. Будь який кватерніон може бути записаний у вигляді:

$$q = s \cdot 1 + a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k, \quad (3.2)$$

де i, j, k – уявні одиниці.

Кожен кватерніон q можна записати у вигляді суми двох кватерніонів: скаляра (s) і вектора ($a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k$), тобто:

$$q = s(q) + v(q) = [\text{scalar}; (\text{vector})], \quad (3.3)$$

де $s(q) = s$ – скалярна частина кватерніона q ; $v(q) = a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k$ – векторна частина кватерніона q .

Наприклад, у кватерніоні $q = 3 - 5 \cdot i + 4 \cdot k$ скалярна частина дорівнює 3, а векторна частина дорівнює $-5 \cdot i + 4 \cdot k$.

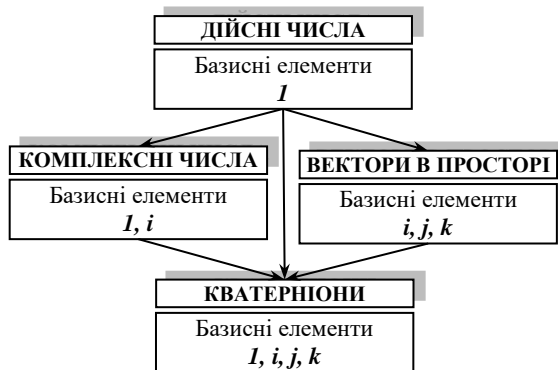


Рис. 3.1. Числові системи та базисні елементи

Іноді кватерніон зручно представляти набором чотирьох чисел: як число та 3D-вектор, тобто як гіперкомплексне число з трьома уявними одиницями i, j, k , що може бути записано у вигляді:

$$\begin{aligned}
 q &= [s, a, b, c] = [\text{scalar}, (\text{vector})] = [s, (a, b, c)] = \\
 &= s \cdot 1 + a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k = s + v.
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Іноді достатньо обмежитись лише окремим видом кватерніонів – вектором. Кватерніон (3.2) приймає вид вектора у випадку рівності нулю його скалярної частини:

$$q(\text{vector}) = a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k; \text{scalar} = 0.
 \tag{3.5}$$

Геометричний зміст операцій з кватерніонами виду (3.5) відповідає геометричному змісту операцій з векторами. Причому, довжина вектора $v = a \cdot i + b \cdot j + c \cdot k$ кватерніона q в тривимірному просторі визначається за формулою (3.6). Цей вектор іде з початку координат O в точку M з координатами a, b, c (рис. 3.3). Тому:

$$|v| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2},
 \tag{3.6}$$

де v – векторна частина кватерніону (3.4), a, b, c – координати точки M , що задає напрямок вектору (рис. 3.2).

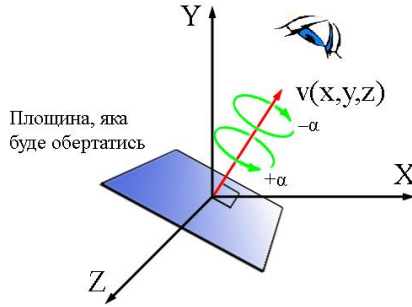


Рис. 3.2. Представлення кватерніону у вигляді вектора v і кута оберту

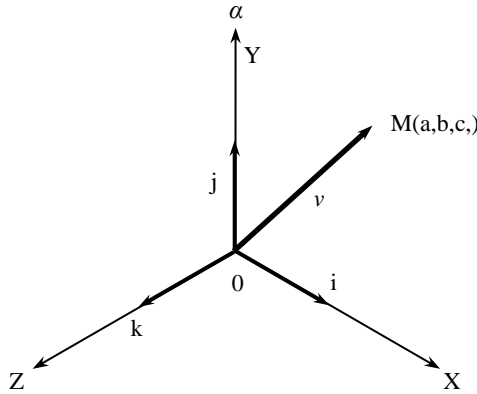


Рис. 3.3. Приклад розташування вектора v в тривимірному просторі

При описанні поворотів кватерніон представляють у вигляді:

$$q(v, \omega) = \cos \frac{\omega}{2} + v \cdot \sin \frac{\omega}{2}, \quad (3.7)$$

де v – одиничний вектор, однонаправлений із віссю повороту; ω – кут повороту.

Кватерніон несе в собі інформацію про оберт на заданий кут навколо вектора, початок якого збігається з початком поточної системи координат (рис. 3.2). Якщо значення кута позитивне ($+\alpha$), то оберт відбувається проти годинникової стрілки (якщо дивитись в напрямку, протилежному напрямку заданого вектора), в протилежному випадку ($-\alpha$) – за годинниковою стрілкою.

Важлива особливість кватерніонів полягає в тому, що підмножиною кватерніонів є дійсні числа $(s, 0, 0, 0)$; комплексні числа $(s, a, 0, 0)$; вектори в тривимірному просторі $(0, a, b, c)$ (рис. 3.3), а при виконанні дій множення кватерніонів не виконується закон комутативності, тобто $q_1 \cdot q_2 \neq q_2 \cdot q_1$.

Крім того три уявні базисні одиниці i, j, k кватерніона можуть бути інтерпретовані як базисні вектори декартової системи координат у тривимірному просторі.

Важливими для розглядуваної проблеми є такі властивості кватерніонів як комутативність та асоціативність за додаванням, комутативність за множенням, асоціативність за множенням та дистрибутивність:

1) кватерніони комутативні та асоціативні за додаванням:

$$q_1 + q_2 = q_2 + q_1;$$

$$(q_1 + q_2) + q_3 = q_2 + (q_1 + q_3);$$

2) кватерніони не комутативні за множенням:

$$q_1 \cdot q_2 \neq q_2 \cdot q_1;$$

3) кватерніони асоціативні за множенням:

$$(q_1 \cdot q_2) \cdot q_3 \neq q_1 \cdot (q_2 \cdot q_3);$$

4) кватерніони дистрибутивні:

$$q_1 \cdot (q_2 + q_3) = q_1 \cdot q_2 + q_1 \cdot q_3.$$

Сферична лінійна інтерполяція здійснюється за виразом:

$$SLI(Q_1, Q_2, t) = (Q_1 \cdot \sin((1-t) \cdot \omega) + Q_2 \cdot \frac{\sin(t \cdot \omega)}{\sin(\omega)}), \quad (3.8)$$

де Q_1, Q_2 – вектори, що належать 4-D сфері, що перетинається площиною P , утвореною даними векторами та центром кола, $P \in (Q_1, Q_2, O)$ (рис. 3.4, а). Очевидно, що шукані при інтерполяції точки будуть належати даній площині; ω – кут між векторами Q_1 та Q_2 ; t – локальний час.

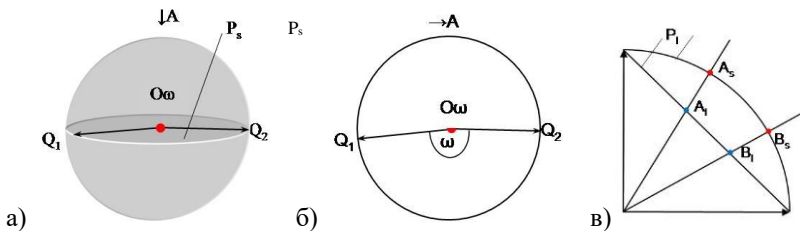


Рис. 3.4. Сферична лінійна інтерполяція:

- а) неспівпадіння точок при лінійній (LI) та сферичній лінійній інтерполяції (SLI);
- б) 4-D сфера та площина, утворена векторами Q_1 та Q_2 і центром кола;
- в) вид А на рисунку 3.4, б

4. Формування інформаційних моделей елементів ГВК

4.1. Особливості інформаційних моделей елементів ГВК

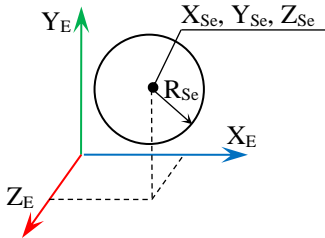
Подання інформації про структурні складові ГВК у виді відповідних інформаційних моделей (ІМ) характеризується реалізацією методично обумовлених кроків в такій *послідовності*: аналіз конструкції складової – складання її так званої схеми заміщення (СЗ, тобто складання ниткової моделі складової) – заміна рухомих та / або нерухомих елементів СЗ складової її 3D-еквівалентами з використанням геометричних примітивів (ГП) – складання ІМ складової як такої з урахуванням її можливої рухомості або нерухомості.

При складанні ІМ складових ГВК враховується той факт, що форма кожного із структурних елементів ГВК може бути описана з використанням кінцевої множини елементарних геометричних примітивів (ГП, G_p – сфера SE, циліндр CR, конус CE, паралелепіпед PD, трапеція TZ) та їх комбінацій.

Точка відліку при описі кожного з ГП формально описується так званою прив'язочною точкою з відповідними їй координатами при їх (ГП) подальшому (можливому) упорядкованому описі:

$$X_{G_p}, Y_{G_p}, Z_{G_p} | G_p \in (Pd, Cr, Se, Ce, Tz), \quad (4.1.1)$$

Нижче представлені приклади описів геометричних примітивів.



Опис ГП типу “сфера”:

Se: $X_{Se}, Y_{Se}, Z_{Se}, R_{Se}$

Рис. 4.1.1. Базове розташування ГП типу “сфера” в СК елемента ГВК

Тут:

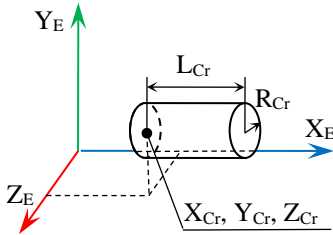
Se – ідентифікатор примітиву Se (sphere) – “сфера”;

X_{Se} – розташування сфери вздовж осі X в СК елемента E, мм;

Y_{Se} – розташування сфери вздовж осі Y в СК елемента E, мм;

Z_{Se} – розташування сфери вздовж осі Z в СК елемента E, мм;

R_{Se} – радіус сфери, мм.



Опис ГП типу “циліндр”:

Cr: $X_{Cr}, Y_{Cr}, Z_{Cr}, R_{Cr}, L_{Cr}$

Рис. 4.1.2. Базове розташування ГП типу “циліндр” в СК елемента ГВК

Тут:

C_r – ідентифікатор примітиву C_r (cylinder) – “циліндр”;

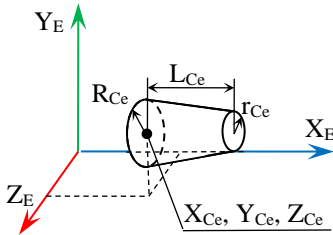
X_{Cr} – розташування циліндра вздовж осі X в СК елемента E , мм;

Y_{Cr} – розташування циліндра вздовж осі Y в СК елемента E , мм;

Z_{Cr} – розташування циліндра вздовж осі Z в СК елемента E , мм;

R_{Cr} – радіус циліндра, мм;

L_{Cr} – довжина циліндра, мм.



Опис ГП типу “конус”:

Ce: $X_{Ce}, Y_{Ce}, Z_{Ce}, R_{Ce}, r_{Ce}, L_{Ce}$

Рис. 4.1.3. Базове розташування ГП типу “конус” в СК елемента ГВК

Тут:

C_e – ідентифікатор примітиву C_e (cone) – “конус”;

X_{Ce} – розташування конуса вздовж осі X в СК елемента E , мм;

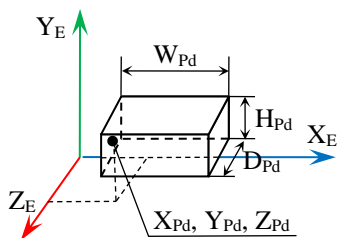
Y_{Ce} – розташування конуса вздовж осі Y в СК елемента E , мм;

Z_{Ce} – розташування конуса вздовж осі Z в СК елемента E , мм;

R_{Ce} – лівий радіус конуса, мм;

r_{Ce} – правий радіус конуса, мм;

L_{Ce} – довжина конуса, мм.



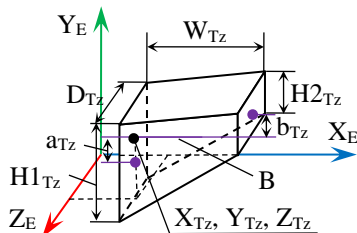
Опис ГП типу “паралелепіпед”:

Pd: $X_{Pd}, Y_{Pd}, Z_{Pd}, W_{Pd}, H_{Pd}, D_{Pd}$

Рис. 4.1.4. Базове розташування ГП типу “паралелепіпед” в СК елемента ГВК

Тут:

Pd – ідентифікатор примітиву Pd (parallelepiped) – “паралелепіпед”;
 X_{Pd} – розташування паралелепіпеда вздовж осі X в СК елемента E, мм;
 Y_{Pd} – розташування паралелепіпеда вздовж осі Y в СК елемента E, мм;
 Z_{Pd} – розташування паралелепіпеда вздовж осі Z в СК елемента E, мм;
 W_{Pd} – ширина паралелепіпеда, мм;
 H_{Pd} – висота паралелепіпеда, мм;
 D_{Pd} – глибина паралелепіпеда, мм.



Опис ГП типу “трапеція”:

Tz: $X_{Tz}, Y_{Tz}, Z_{Tz}, D_{Tz}, W_{Tz}, H1_{Tz}, H2_{Tz}, a_{Tz}, b_{Tz}$

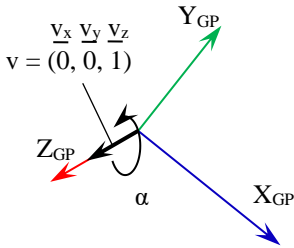
Рис. 4.1.5. Базове розташування ГП типу “трапеція” в СК елемента ГВК

Тут:

Tz – ідентифікатор примітиву Tz (Trapeze) – “трапеція”;
 X_{Tz} – розташування трапеції вздовж осі X в СК елемента E, мм;
 Y_{Tz} – розташування трапеції вздовж осі Y в СК елемента E, мм;
 Z_{Tz} – розташування трапеції вздовж осі Z в СК елемента E, мм;
 D_{Tz} – глибина трапеції, мм;
 W_{Tz} – ширина трапеції, мм;
 $H1_{Tz}$ – ліва висота трапеції, мм;
 $H2_{Tz}$ – права висота трапеції, мм;
 a_{Tz} – відстань між базовою віссю B та центром грані із висотою H1, мм;
 b_{Tz} – відстань між базовою віссю B та центром грані із висотою H2, мм.

При потребі змінити орієнтацію ГП вказується кватерніон його орієнтації, що описується за рахунок 4-ох додаткових параметрів:

$$Q = [S_Q, X_Q, Y_Q, Z_Q]. \quad (4.1.2)$$



$$Q = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = (\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2})$$

Приклад геометричного примітиву типу “циліндр” до і після його орієнтації (оберту навколо осі Y на 90°) представлено на рисунку 4.1.6.

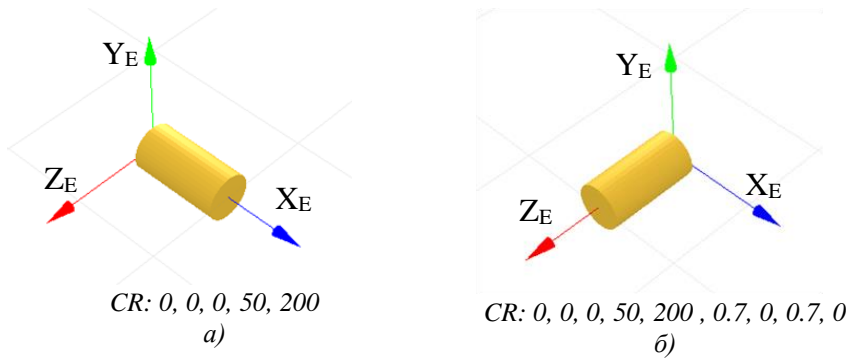


Рис. 4.1.6. Приклад опису та відповідної 3D-моделі ГП типу “циліндр”:
а) без кватерніона орієнтації;
б) із кватерніоном орієнтації

4.2. Інформаційні моделі маніпуляційних систем промислових роботів

Запропонована методика складання інформаційних моделей маніпуляційних систем промислових роботів складається із 6 кроків (**К**):

К1. Аналіз конфігурації МС ПР, визначення кількості активних (рухомих) і неактивних (нерухомих) ланок, визначення типів геометричних примітивів (рис. 4.2.1), якими можна відобразити форму описуваних ланок при моделюванні (див. п. 4.1).

$$\begin{aligned}
& L_1: (D: x_1, y_1, z_1; S: s_1); \\
& \dots \\
& L_{i_L}: (D: x_{i_L}, y_{i_L}, z_{i_L}; S: s_{i_L}); \\
& \},
\end{aligned}$$

де P – ідентифікатор розташування СК МС ПР в глобальній СК в координатах (x_p, y_p, z_p) , мм; O – ідентифікатор орієнтації СК МС ПР в глобальній СК, представляється у вигляді кватерніона (w_o, x_o, y_o, z_o) ; L_{i_L} – ідентифікатор ланки із номером i_L ; D – ідентифікатор напрямку ланки із параметрами, який задається у вигляді одиничного вектора з параметрами $(x_{i_L}, y_{i_L}, z_{i_L})$, мм; S – ідентифікатор довжини ланки, значення вказується в параметрі s_{i_L} , мм, знак розділення “;” є обов’язковим.

КЗ. Опис обмежень для активних ланок МС.

Для оберտального типу переміщення УК вказується 2 кватерніона, якими описується мінімальне та максимальне відхилення СК L_{i_L} -ої ланки відносно СК попередньої $L_{(i-1)_L}$ -ої ланки (див. вираз (4.2.2)).

Для лінійного типу переміщення лінійних УК вказуються початкові та кінцеві координати зміщення СК описуваної L_{i_L} -ої ланки в СК попередньої $L_{(i-1)_L}$ -ої ланки (див. вираз (4.2.3)).

$$\begin{aligned}
& L_{i_L}: (D: x_{i_L}, y_{i_L}, z_{i_L}; S: s_{i_L}; \\
& \quad Q_{\min}: w_{Q_{\min_{i_L}}}, x_{Q_{\min_{i_L}}}, y_{Q_{\min_{i_L}}}, z_{Q_{\min_{i_L}}}; \\
& \quad Q_{\max}: w_{Q_{\max_{i_L}}}, x_{Q_{\max_{i_L}}}, y_{Q_{\max_{i_L}}}, z_{Q_{\max_{i_L}}}),
\end{aligned} \tag{4.2.2}$$

де Q_{\min} , Q_{\max} – ідентифікатори обмежень оберտального типу переміщення L_{i_L} -ої ланки, представляються у вигляді кватерніонів:

$$\left(w_{Q_{\min_{i_L}}}, x_{Q_{\min_{i_L}}}, y_{Q_{\min_{i_L}}}, z_{Q_{\min_{i_L}}} \right) \text{ та } \left(w_{Q_{\max_{i_L}}}, x_{Q_{\max_{i_L}}}, y_{Q_{\max_{i_L}}}, z_{Q_{\max_{i_L}}} \right).$$

$$\begin{aligned}
& L_{i_L}: (D: x_{i_L}, y_{i_L}, z_{i_L}; S: s_{i_L}; \\
& \quad L_{\min}: x_{L_{\min_{i_L}}}, y_{L_{\min_{i_L}}}, z_{L_{\min_{i_L}}}; \\
& \quad L_{\max}: x_{L_{\max_{i_L}}}, y_{L_{\max_{i_L}}}, z_{L_{\max_{i_L}}}),
\end{aligned} \tag{4.2.3}$$

де L_{\min} , L_{\max} – ідентифікатори обмежень лінійного типу переміщення L_{i_L} -ої ланки, представляються у вигляді векторів: $\left(x_{L_{\min i_L}}, y_{L_{\min i_L}}, z_{L_{\min i_L}} \right)$ та $\left(x_{L_{\max i_L}}, y_{L_{\max i_L}}, z_{L_{\max i_L}} \right)$, мм.

К4. Опис геометричних примітивів. Для кожної L_{i_L} -ої ланки вказується група ГП, які описуються в її СК. Множина геометричних примітивів, якими може бути описана форма ланки, обмежена вказаними в п. 4.1 типами:

$$L_{i_L} : (D: x_{i_L}, y_{i_L}, z_{i_L}; S: s_{i_L}; GP: [GP_{1_{i_L}}, \dots, GP_{N_{i_L}}]);, \quad (4.2.4)$$

де GP – ідентифікатор множини геометричних примітивів $GP_{1_{i_L}}, \dots, GP_{N_{i_L}}$; $GP_{N_{i_L}}$ – геометричний примітив із описом за п. 4.1.

К5. Задання додаткових параметрів. Вказання для кожної ланки її маси та для кожної активної ланки максимальної швидкості її переміщення (град/с для обертального, або м/с для лінійного типу переміщення L_{i_L} -ої ланки) відповідно до паспортних даних ПР(див. вираз (4.2.5)):

$$L_{i_L} : (D: x_{i_L}, y_{i_L}, z_{i_L}; S: s_{i_L}; M: m_{i_L}; V: v_{i_L});, \quad (4.2.5)$$

де M – ідентифікатор маси L_{i_L} -ої ланки, m_{i_L} – значення маси ланки, кг; V – ідентифікатор максимальної швидкості переміщення L_{i_L} -ої ланки із значенням v_{i_L} , град/с або м/с.

К6. Формування ІМ МС як такого (див. вираз (4.2.6)):

$$\begin{aligned} \text{ІММСПР} = \{ & \\ & P: x, y, z; \\ & O: w_o, x_o, y_o, z_o; \\ & L_{i_L} : (D: x_{i_L}, y_{i_L}, z_{i_L}; \\ & \quad S: s_{i_L}; M: m_{i_L}; V: v_{i_L}; \\ & \quad GP: [GP_{1_{i_L}}, \dots, GP_{N_{i_L}}]; \\ & \quad); \\ & \} , \end{aligned} \quad (4.2.6)$$

Приклад ІМ для абстрактного ПР з МС типу “SKARA” представлений нижче:

```

MSX = {
  P:0,0,0;
  O:0,0,0;
  L1:(D:0,1,0;S:1300;GP:[CR:0, 0, 0, 200, 1200;]);
  L2:(D:1,0,0;S:600;Qmin: 0.500,0.866,0,0; Qmax: 0.500,-0.866,0,0;
    GP:[CR:0, 0, 0, 180, 100,0.707,0,0,-0.707;PD:50, 0, 0, 500, 100,
    300;CR:0, 600, 0, 180, 100,0.707,0,0,-0.707;]);
  L3:(D:0,1,0;S:500; Qmin: 0.500,0.866,0,0; Qmax: 0.500,-0.866,0,0;
    GP:[CR:-50, 0, 0, 140, 100,0.707,0,0,-0.707;PD:-150, -150, 0, 750, 200,
    300;TZ:-250, 30, 0, 300, 300, 750, 300, -200, 0, 0.707,0,0,0.707;])
  L4:(D:1,0,0;S:0; Qmin: 0.500,0,0.866,0; Qmax: 0.500,0,-0.866,0;);
  L5:(D:0,1,0;S:100; Lmin: 0, 0, 0; Lmax: 0, 500, 0;GP:[CR:0, -900, 0, 50,
    1000;]);
  L6:(D:0,-1,0;S:300);
}

```

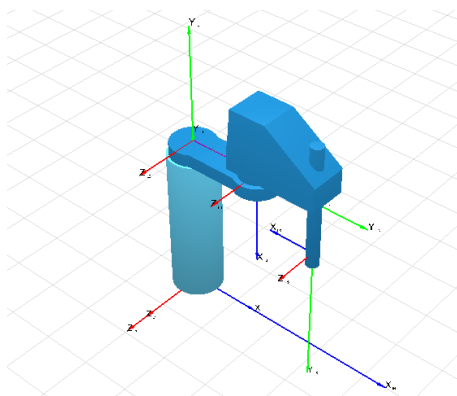


Рис. 4.2.3. Ілюстрація побудованої 3D-моделі МС ПР за ІМ МС ПР

4.3. ІМ схватів промислових роботів

ІМ Сх ПР будуються фактично в тій же послідовності, що й ІМ МС ПР, і виконуються наступними кроками (**К**).

К1. Аналіз конструкції Сх. Передбачає проведення детального аналізу всіх неактивних елементів Сх, що можуть бути представлені як окремі компоненти. При цьому визначається їх кількість, геометричні розміри, орієнтація (якщо це є необхідним для більш детальної схожості Сх з конструктивним оригіналом), рухомість, визначаються координати P_{Gr} та координати кріплення Сх до кінцевої ланки МС ПР, що в свою чергу є початком СК Сх (CFP , від англ. *Coordinates of Fixing Point* – координати точки кріплення). Структура CFP подається наступним чином:

$$CFP = \left[(x_{CFP}; y_{CFP}; z_{CFP}), Q_{CFP} (s_{Q_{CFP}}; x_{Q_{CFP}}; y_{Q_{CFP}}; z_{Q_{CFP}}) \right], \quad (4.3.1)$$

де CFP – ідентифікатор координат точки кріплення Сх ПР до МС ПР;
 $(x_{CFP}; y_{CFP}; z_{CFP})$ – координати точки кріплення Сх ПР до МС ПР в СК ПР;
 $Q_{CFP}(s_{Q_{CFP}}; x_{Q_{CFP}}; y_{Q_{CFP}}; z_{Q_{CFP}})$ – кватерніон орієнтації СК Сх ПР, що впливає на зміну положення / орієнтації всіх елементів, описаних в СК Сх ПР.

К2. Формування базової кінематичної структури Сх. Представлення за результатами **К1** аналізованих конструктивних складових Сх у вигляді прямих із відносним розташуванням кожної складової Сх для подальшого опису їх обертальних та / або лінійних переміщень та опису геометричними примітивами. При цьому описуються складові (компоненти) Сх так, щоб його опис не був інформаційно збитковим, тобто з виділенням лише тих елементів, які безпосередньо визначають його (Сх) функціональність, беруть участь у ТВ Сх з ОМ та необхідні для подальших розрахунків щодо можливості зіткнень (колізій) між елементами ГВК та самозіткнень між елементами МС ПР із ОМ.

К3. Групування елементів Сх зводиться до формування груп елементів конструкції Сх – нерухомих (група С) та рухомих (група V). Якщо конструктивний елемент Сх при його (Сх) функціонуванні не може змінювати своє положення в СК Сх, тобто є нерухомим, він відноситься до групи С і в подальшому описується відповідним геометричним примітивом (див. **К4**). Структура групи С має наступний вигляд:

$$C = \langle GP_{i_c} | i_c = \overline{1, I_C} \rangle, \quad (4.3.2)$$

де С – ідентифікатор групи С (скорочення від англ. *Constant* – постійна); I_C – загальна кількість елементів групи С; GP_{i_c} – (скорочення від англ. *Geometric primitive* – геометричний примітив), опис кожного i -го елемента Сх, що може бути віднесений до одного із п'яти примітивів, має наступну структуру:

$$GP_{i_c} \in \{ Pd_{i_c}; Cr_{i_c}; Se_{i_c}; Ce_{i_c}; Tz_{i_c} \}, \quad (4.3.3)$$

де Pd_{i_c} – опис геометричного примітиву “паралелепіпед”; Cr_{i_c} – опис геометричного примітиву “циліндр”; Se_{i_c} – опис геометричного примітиву “куля”; Ce_{i_c} – опис геометричного примітиву “конус”; Tz_{i_c} – опис геометричного примітиву “трапеція”.

Якщо j -ий конструктивний елемент Сх може змінювати своє положення в СК Сх, тобто є рухомим, то він відноситься до групи V, що містить описи j -го елемента з його обмеженнями (лінійними або обертальними) або нову групу V, якщо зміна положення / орієнтації

елемента відбувається в СК попередньої групи V . Структура групи V має наступний вигляд:

$$V_{i_v} = \left\langle L_{i_v}, \left\langle GP_{j_{i_v}} \nabla V_{j_{i_v}} \mid j_{V_i} = \overline{1, J_{V_i}} \right\rangle \mid i_v = \overline{1, I_V} \right\rangle, \quad (4.3.4)$$

де V_{i_v} – ідентифікатор групи V (від англ. *Variable* – змінна); I_V – кількість груп V в описі СхПР; $GP_{j_{i_v}}$ – геометричний примітив (аналогічний до виразу (4.3.3)); $V_{j_{i_v}}$ – опис нової j_v -ої групи V , яка описується в СК групи V_{i_v} , тобто має власну СК, обмеження щодо можливих переміщень та відповідний склад елементів; J_{V_i} – загальна кількість компонентів групи V_{i_v} ; ∇ – математичний знак логічної операції “виключне або”; L_{i_v} – ідентифікатор обмеження (від англ. *Limitation* – обмеження), має наступну структуру:

$$L_{i_v} = \left[Q_{i_v}^{Lb}(s_{i_v}^{Lb}; x_{i_v}^{Lb}; y_{i_v}^{Lb}; z_{i_v}^{Lb}), Q_{i_v}^{Le}(s_{i_v}^{Le}; x_{i_v}^{Le}; y_{i_v}^{Le}; z_{i_v}^{Le}), \right. \\ \left. Q_{i_v}^{Rb}(s_{i_v}^{Rb}; x_{i_v}^{Rb}; y_{i_v}^{Rb}; z_{i_v}^{Rb}), Q_{i_v}^{Re}(s_{i_v}^{Re}; x_{i_v}^{Re}; y_{i_v}^{Re}; z_{i_v}^{Re}) \right], \quad (4.3.5)$$

де $Q_{i_v}^{Lb}(s_{i_v}^{Lb}; x_{i_v}^{Lb}; y_{i_v}^{Lb}; z_{i_v}^{Lb})$ – кватерніон (Q) початкової позиції ($Q_{i_v}^{Lb}$) початку СК поточної групи V_{i_v} відносно СК Сх ПР, або СК попередньої групи $V_{(i-1)_v}$ (якщо поточна група V_{i_v} є елементом попередньої групи $V_{(i-1)_v}$); $Q_{i_v}^{Le}(s_{i_v}^{Le}; x_{i_v}^{Le}; y_{i_v}^{Le}; z_{i_v}^{Le})$ – кватерніон кінцевої позиції ($Q_{i_v}^{Le}$) початку СК поточної групи V_{i_v} відносно СК Сх ПР, або СК попередньої групи $V_{(i-1)_v}$ (якщо поточна група V_{i_v} є елементом попередньої групи $V_{(i-1)_v}$); $Q_{i_v}^{Rb}(s_{i_v}^{Rb}; x_{i_v}^{Rb}; y_{i_v}^{Rb}; z_{i_v}^{Rb})$ – кватерніон початкової орієнтації ($Q_{i_v}^{Rb}$) СК поточної групи V_{i_v} відносно СК Сх ПР, або СК попередньої групи $V_{(i-1)_v}$ (якщо поточна група V_{i_v} є елементом попередньої групи $V_{(i-1)_v}$); $Q_{i_v}^{Re}(s_{i_v}^{Re}; x_{i_v}^{Re}; y_{i_v}^{Re}; z_{i_v}^{Re})$ – кватерніон кінцевої орієнтації ($Q_{i_v}^{Re}$) СК поточної групи V_{i_v} відносно СК Сх ПР, або СК попередньої групи $V_{(i-1)_v}$ (якщо поточна група V_{i_v} є елементом попередньої групи $V_{(i-1)_v}$).

К4. Опис елементів Сх геометричними примітивами виконується для кожного визначеного i -го та j -го елементів Сх за допомогою наступних

геометричних примітивів: Pd – паралелепіпед, Cr – циліндр, Se – сфера, Ce – конус, Tz – трапеція (див. п. 4.1.).

K5. Вказання значення маси Cx:

$$M = (m_{Cx}), \quad (4.3.6)$$

де M – ідентифікатор маси Cx; m_{Cx} – значення маси Cx, кг.

K6. Формування ФМ CxПР як такої запропоновано виражати у вигляді впорядкованої послідовності геометричних примітивів, який може належати до групи рухомих або нерухомих елементів. В загальному випадку з врахуванням прийнятих позначень та змістом символу \vee (логічна операція “або”) універсальний вираз ФМ Cx ПР відповідно до вище наведеного є наступним:

$$IMCxПР = \left\langle CFP, M, \left(C = \left\langle GP_{i_c} \mid i_c = \overline{1, I_c} \right\rangle \right) \vee \right. \\ \left. \vee \left(V_{i_v} = \left\langle L_{i_v}, \left\langle GP_{j_{V_i}} \nabla V_{j_{V_i}} \mid j_{V_i} = \overline{1, J_{V_i}} \right\rangle \mid i_v = \overline{1, I_v} \right\rangle \right) \right\rangle. \quad (4.3.7)$$

Приклад ІМ пневматичного Cx ПР моделі “LGR 32” з 2-ма обертальними затискними елементами (виробник – фірма Schunk, Німеччина), представлений нижче:

```
Gripper(LGR 32) = {
  CFP[(0, 0, 0)(0.707,0,0,0.707)]
  M(2)
  C{
    GP:[PD:0, 0, 0, 130.5, 60, 37;]
  }
  V{
    LIM[(0, 119, 24, 0)(0, 119, 24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, 0.707)]
    GP:[
      PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
      PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
      PD:20, 12.5, 0, 58, 14, 16;
      PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,0.174;
      PD:76, 13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,-0.174;
      PD:110, -0.5, 0, 6, 11.5, 16;
    ]
  }
  V{
    LIM[(0, 119, -24, 0)(0, 119, -24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, -0.707)]
    GP:[
      PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
      PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
      PD:20, -12.5, 0, 58, 14, 16;
      PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,-0.174;
      PD:76, -13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,0.174;
      PD:110, 0.5, 0, 6, 11.5, 16;
    ]
  }
}
```

}
}

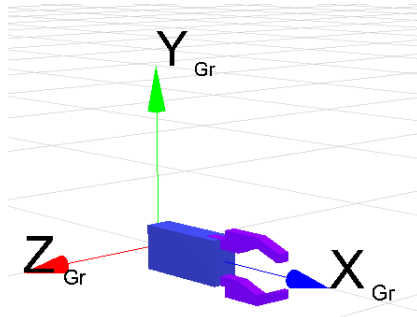


Рис. 4.3.1. 3D-модель Сх ПР, побудована за ІМ Сх ПР

4.4. ІМ об'єктів маніпулювання

Склад та послідовність кроків (**К**) при складанні ІМ ОМ враховує той факт, що ОМ описується тільки як елемент групи **С**.

К1. Аналіз геометричної форми та розмірів описуваного ОМ. Розбиття моделі ОМ на множину елементарних поверхонь, кожна з яких (поверхня) може бути описана елементарним геометричним примітивом.

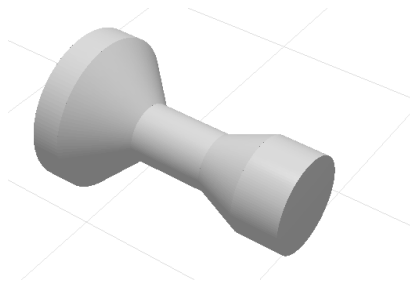


Рис. 4.4.1. Зображення аналізованого ОМ

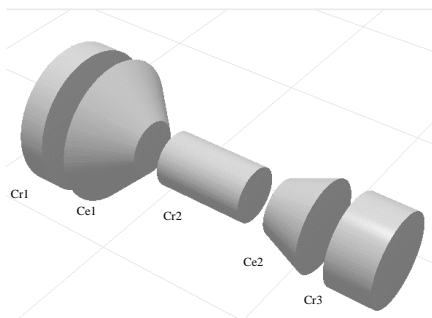


Рис. 4.4.2. Розбиття ОМ на множину елементарних примітивів

К2. Задання СК ОМ в СК Пр РП. Визначення точки (початку СК ОМ) в СК Пр РП, та вказання орієнтації ОМ в СК Пр РП за допомогою кватерніона орієнтації. СК ОМ в СК Пр РП описується за допомогою параметра CFP :

$$CFP = \left[(x_{CFP}; y_{CFP}; z_{CFP}), Q_{CFP} (s_{Q_{CFP}}; x_{Q_{CFP}}; y_{Q_{CFP}}; z_{Q_{CFP}}) \right], \quad (4.4.1)$$

де CFP – ідентифікатор розташування СК ОМ в СК Пр РП; $(x_{CFP}, y_{CFP}, z_{CFP})$ – координати початку СК ОМ в СК Пр РП; $Q_{CFP} (s_{Q_{CFP}}, x_{Q_{CFP}}, y_{Q_{CFP}}, z_{Q_{CFP}})$ – кватерніон орієнтації СК ОМ.

К3. Опис геометричних примітивів в СК ОМ. Для тіл обертання розташування геометричних примітивів описується вздовж осі X СК ОМ. Всі геометричні примітиви згруповані та відносяться до групи C (група нерухомих елементів).

Структура групи C має наступний вигляд:

$$C = \left\langle GP_{i_c} \mid i_c = \overline{1, I_C} \right\rangle, \quad (4.4.2)$$

де C – ідентифікатор групи C (скорочення від англ. *Constant* – постійна); I_C – кількість елементів групи C ; GP_{i_c} – (скорочення від англ. *Geometric primitive* – геометричний примітив) опис кожного i -го елемента Пр, що може бути віднесений до одного із 5-ти примітивів (див. п. 4.1), має наступну структуру:

$$GP_{i_c} \in \{ Pd_{i_c}; Cr_{i_c}; Se_{i_c}; Ce_{i_c}; Tz_{i_c} \}, \quad (4.4.3)$$

де Pd_{i_c} – опис геометричного примітиву “паралелепіпед”; Cr_{i_c} – опис геометричного примітиву “циліндр”; Se_{i_c} – опис геометричного примітиву “куля”; Ce_{i_c} – опис геометричного примітиву “конус”; Tz_{i_c} – опис геометричного примітиву “трапеція”.

К5. Вказання значення маси ОМ:

$$M = (m_{OM}), \quad (4.4.4)$$

де M – ідентифікатор маси ОМ; m_{OM} – значення маси ОМ, кг.

К6. Формування ІМ ОМ як упорядкованої множини елементарних геометричних примітивів.

$$IMOM = \left\langle CFP, M, \left(C_{OM} \in \left\langle Gp_{i_c} \mid i_c = \overline{1, I_c} \right\rangle \right) \right\rangle. \quad (4.4.5)$$

4.5. ІМ технологічного обладнання

В основу формування ІМ ТО покладено, як і для інших структурних складових ГВК, опис загальної конструкції ТО описом окремих ГП, на які користувач попередньо декомпозиував загальну конструкцію ТО, та їх упорядкований взаємопов'язаний опис. ІМ ТО складаються за рахунок виконання наступних кроків **К**.

К1. Аналіз конструкції ТО. Визначення рухомих елементів ТО. Розбиття ТО на множину елементарних примітивів. Визначення СК ТО для відповідних одиниць ТО ГВК.



Рис. 4.5.1. Загальний вигляд ТО на прикладі металорізального верстата мод. 1B340Ф30

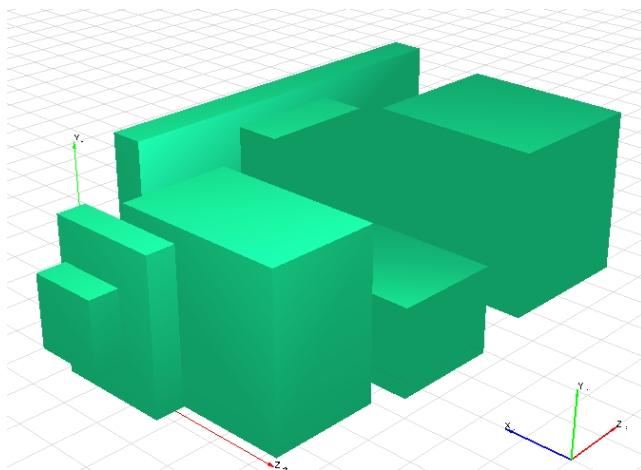


Рис. 4.5.2. Розбиття ТО на групу елементарних примітивів

К2. Опис початку СК ТО в СК ПР. Задання координат початку СК ТО в СК ПР, та вказання орієнтації ТО відносно ПР за рахунок кватерніону орієнтації.

$$CFP = \left[(x_{CFP}; y_{CFP}; z_{CFP}), Q_{CFP} (s_{Q_{CFP}}; x_{Q_{CFP}}; y_{Q_{CFP}}; z_{Q_{CFP}}) \right], \quad (4.5.1)$$

де CFP – ідентифікатор розташування СК ТО в СК ПР, $(x_{CFP}, y_{CFP}, z_{CFP})$ – координати початку СК ТО в СК ПР; $Q_{CFP} (s_{Q_{CFP}}, x_{Q_{CFP}}, y_{Q_{CFP}}, z_{Q_{CFP}})$ – кватерніон орієнтації СК ТО.

К3. Опис нерухомих елементів ТО. За допомогою ГП описується множина конструктивних частин ТО в СК ТО. Детальний опис даного кроку аналогічний до опису групи C формування ІМ Сх (див. п. 4.3).

К4. Опис рухомих елементів ТО. Детальний опис даного кроку аналогічний до опису групи V формування ІМ Сх (див. п. 4.3).

К5. Формування ІМ ТО як упорядкованої множини елементарних геометричних примітивів.

$$IMTO = \left\langle CFP, \left(C = \left\langle GP_{i_c} \mid i_c = \overline{1, I_c} \right\rangle \vee \right. \right. \\ \left. \left. \vee \left\langle V_{i_v} = \left\langle L_{i_v}, \left\langle GP_{j_{v_i}} \nabla V_{j_{v_i}} \mid j_{v_i} = \overline{1, J_{v_i}} \right\rangle \mid i_v = \overline{1, I_v} \right\rangle \right) \right\rangle. \quad (4.5.2)$$

4.6. ІМ пристосувань технологічного обладнання

Послідовність формування ІМ Пр фактично не відрізняється від описаного вище.

К1. Аналіз конструкції ТО. Визначення рухомих елементів ТО. Розбиття ТО на множину елементарних примітивів. Визначення СК ТО для відповідних одиниць ТО.

К2. Опис початку СК ТО в СК ПР. Задання координат початку СК ТО в СК ПР, та вказання орієнтації ТО відносно ПР за рахунок кватерніону орієнтації.

$$CFP = \left[(x_{CFP}; y_{CFP}; z_{CFP}), Q_{CFP} (s_{Q_{CFP}}; x_{Q_{CFP}}; y_{Q_{CFP}}; z_{Q_{CFP}}) \right], \quad (4.6.1)$$

де CFP – ідентифікатор розташування СК ТО в СК ПР, $(x_{CFP}, y_{CFP}, z_{CFP})$ – координати початку СК ТО в СК ПР; $Q_{CFP}(s_{Q_{CFP}}, x_{Q_{CFP}}, y_{Q_{CFP}}, z_{Q_{CFP}})$ – кватерніон орієнтації СК ТО.

К3. Опис нерухомих елементів ТО. За допомогою геометричних примітивів описується множина конструктивних частин ТО в СК ТО. Детальний опис даного кроку аналогічний до опису групи C формування ІМ Сх (див. п. 4.3).

К4. Опис рухомих елементів ТО. Детальний опис даного кроку аналогічний до опису групи V формування ІМ Сх (див. п. 4.3).

К5. Формування ІМ ТО як упорядкованої множини елементарних геометричних примітивів.

$$\begin{aligned}
 \text{ІМПрРП} = & \left\langle CFP, \left(C = \left\langle GP_{i_c} \mid i_c = \overline{1, I_c} \right\rangle \right) \vee \right. \\
 & \left. \vee \left(V_{i_v} = \left\langle L_{i_v}, \left\langle GP_{j_{v_i}} \nabla V_{j_{v_i}} \mid j_{v_i} = \overline{1, J_{V_i}} \right\rangle \right\| i_v = \overline{1, I_v} \right) \right\rangle.
 \end{aligned} \tag{4.6.2}$$

Приклад ІМ Пр РП типу “лещата” представлений нижче:

```

Device(Vice) = {
  CFP[(350, 90, 0)(1, 0, 0, 0)]
  C{
    GP:[
      PD:-100,20,0,240,20,400;
      PD:-75,130,160,200,200,30;
      PD:-75,80,-150,200,150,70;
    ]
  }
  V{
    LIM[(0, -75, 80, 30)(0, -75, 80, -70)(1, 0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)]
    GP:[
      PD:0,40,0,200,200,70;
      CR:30,0,0,20,250,0.7,0,0.7,0;
      CR:160,0,0,20,250,0.7,0,0.7,0;
    ]
  }
}

```

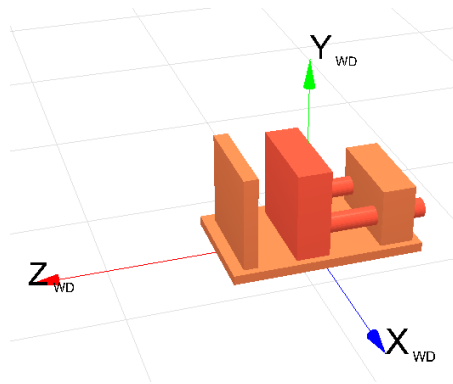


Рис. 4.6.1. 3D-модель Пр РП, побудована за ІМ Пр РП

5. Методика формування безколізійних траєкторій

Короткий зміст представленої методики зводиться до побудови початкової колізійної траєкторії переміщення ТРК, яка описується кубічним сплайном (*cubic-spline*), формуванню кінцевої множини проміжних опорних точок для забезпечення безколізійної траєкторії, обчислення її (сформованої траєкторії) часових і енергетичних параметрів.

Кроки (К) запропонованої методики, що програмно реалізована в розробленому ПП “Robix” (див. п. 6), наступні.

К1. Обробка вхідних даних, побудова колізійної *cubic-spline* траєкторії по заданих точках C_{t-1} , D_{t-1} , D_t , C_t (рис. 5.1).

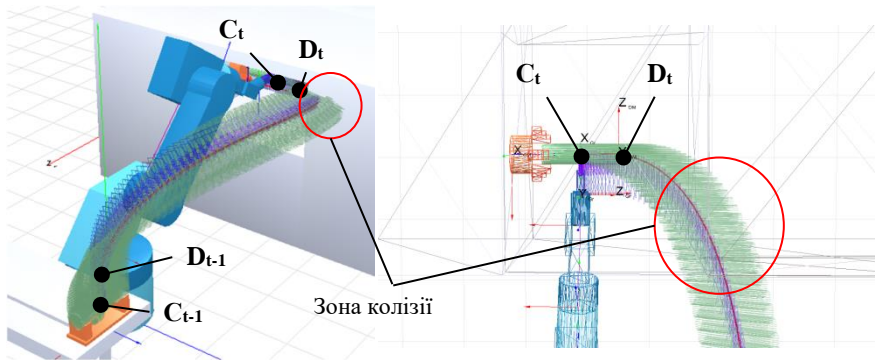


Рис. 5.1. Початкова колізійна траєкторія

К2. Визначення величини об’єму проникнення ТРК в перешкоду V_{colmax} в момент часу τ_{colmax} із заданою дискретизацією точок траєкторії ($N_{Tr} = 100$ точок) (рис. 5. 2).

К3. Пошук симплекса перетину елементів ТРК (МС, S_x , OM) і перешкод (перепон) у вигляді РП (технологічного обладнання, засобів

технологічного оснащення) або зовнішніх при максимальному значенні об'єму перетину V_{colmax} (рис. 5.3).

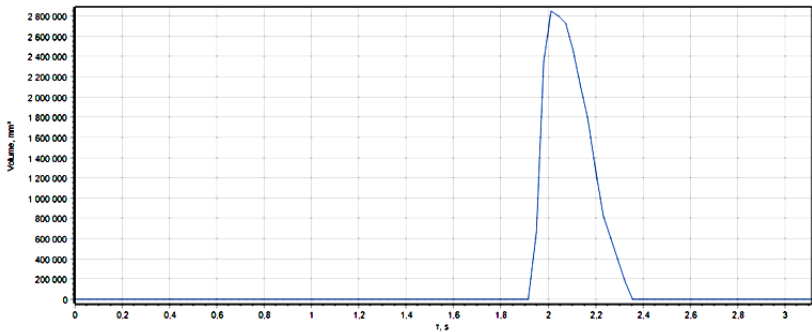


Рис. 5.2. Об'єм і час проникнення ТРК в зоні колізії за рис. 5.1

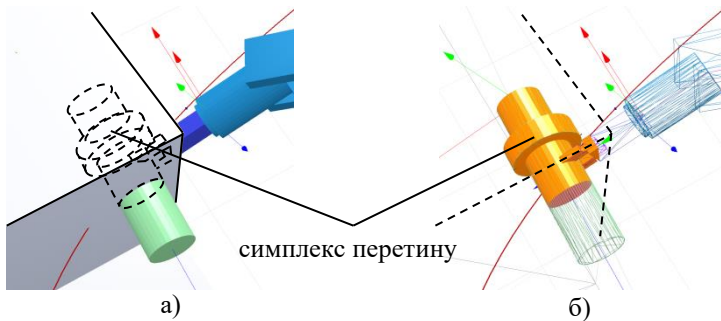
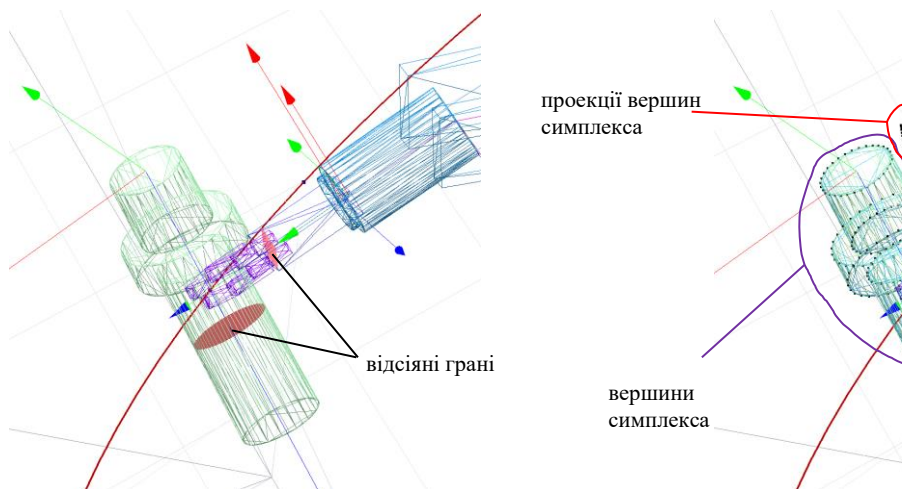


Рис. 5.3. Схема колізійного проникнення ТРК (Сх з ОМ) в перепоні: а) загальний вигляд; б) виділена частина проникнення об'ємом V_{colmax}

К4. Перебір всіх граней отриманого симплекса перетину з відсіюванням граней, що лежать на площині граней перепони (рис. 5.4, а).

К5. Визначення метричного відстані Dz для кожної отриманої (відсіюної) грані за рахунок:

К5.1. Проекціювання кожної вершини симплекса перетину на кожну отриману (відсіюну) грань (рис. 5.4, б).



а)

Рис. 5.4. Схема формування множини вершин і їх проєкцій:
 а) - ілюстрація відсіяних граней; б) вершини симплекса і їх проєкції на одній з відсіяних граней

К5.2. Визначення довжини відрізка Dz між кожною вершиною симплекса перетину і отриманою її проєкцією на відсіяну грань (рис. 5.5, а).

К5.3. Вибір найбільшого значення довжини Dz_{max} , до якого додається зазор Δ не більше 5-10 мм (рис. 5.5, б).

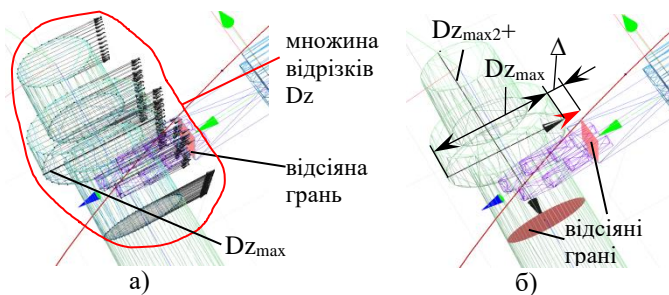


Рис. 5.5. Схема отримання величини корекції

К6. Визначення величини зсуву полюса Sx на отримане значення $(Dz_{max} + \Delta)$ у напрямку вектора, спрямованого по Dz_{max} від перепони. Нове

положення полюса S_x відображає координати корегувальної проміжної точки траєкторії (т. B). Далі – формування траєкторій для отриманої множини проміжних точок і вибір тієї, де екстремум значення об’єму перетину конструктивних елементів ТРК з перешкодою (див. рис. 5.2) буде найменшим (рис. 5.6).

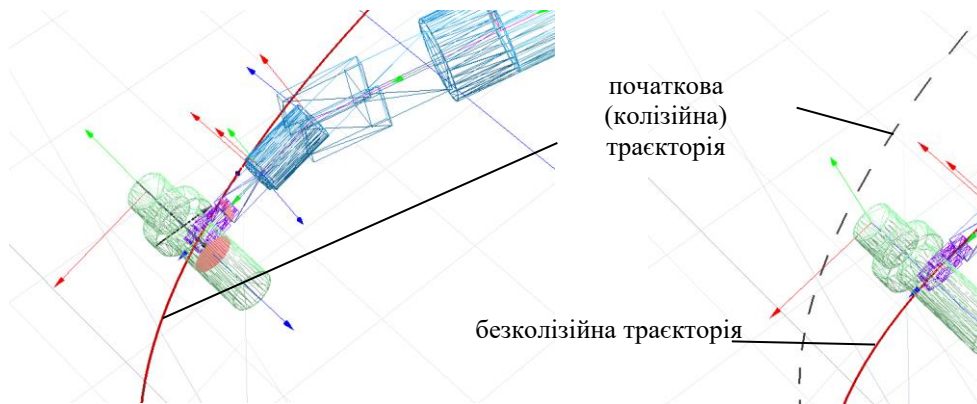


Рис. 5.6. Ілюстрація початкової колізійної та згенерованої безколізійної траєкторії

К7. Якщо симплекс перетину існує для траєкторії, що проходить через отриману проміжну т. B , то кроки **К3-К7** повторюються з генерацією траєкторій через т. B . Якщо симплекс перетину відсутній, то рішення знайдено.

К8. Обчислення часових (швидкодія) та енергетичних (енергоємність) параметрів згенерованої траєкторії між т. C_{i-1} і т. C_i , тобто параметрів $\tau_{C_{i-1}-C_i}, E_{C_{i-1}-C_i}$.

6. Програмний продукт “Robix”

6.1. Структура розробленого програмного продукту “Robix”

На базі запропонованих тлумачення та методики визначення параметрів ТВ S_x ПР з ОМ розроблено програмний продукт (ПП) “Robix” на мові програмування Delphi, який дозволяє автоматизовано розв’язувати ряд задач, пов’язаних із визначенням параметрів ТВ.

Узагальнена структура розробленого ПП “Robix” представлена на рисунку 6.1.1.

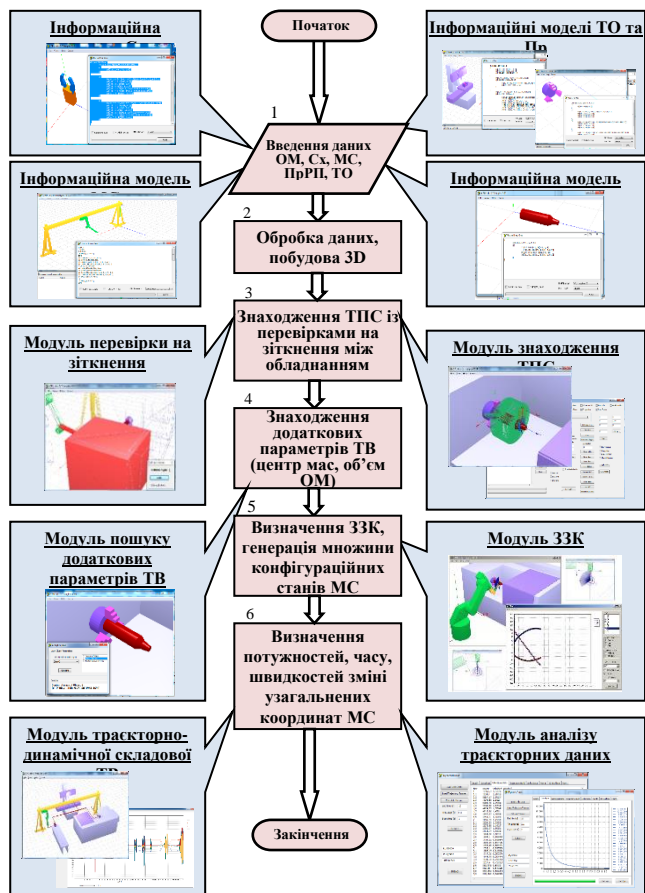


Рис. 6.1.1. Узагальнена структура розробленого ПП “Robix”

Складається програмний продукт із наведених нижче модулів.

➤ Модуль побудови 3D-сцени (перетворює інформаційні моделі ОМ, ПР, ТО у відповідну структуру даних, на основі якої будуються тримірні моделі елементів сцени, що в подальшому використовуються для автоматизованого вирішення розрахункових задач).

➤ Модуль перевірки на зіткнення (необхідний для визначення наявності зіткнень між різними елементами ГВК при реалізації траєкторних переміщень ТРК, в якого основу закладено побудову різниці

Міньковського, тобто симплексу елементів, що перевіряються, за допомогою відомого алгоритму QuickHull).

➤ Модуль знаходження ТПС (дозволяє визначити величину затиску ЗЕ S_x для кожної елементарної поверхні ОМ, множину КПС та ЛПС, дозволяє будувати таблицю вихідних числових даних у зрозумілій для користувача формі, дозволяє знаходити перетини множин ТПС між різними РП).

➤ Модуль визначення додаткових параметрів ТВ (дозволяє визначити об'єм, координати центра мас ОМ в системі координат ОМ та ПР, а також вагу інших складових ТРК).

➤ Модуль розв'язування ЗЗК (необхідний для визначення параметрів траєкторно-динамічної складової ТВ з реалізацією модифікованого алгоритму розв'язування ЗЗК – FABRIK, за отриманими варіантами розв'язування ЗЗК будуються графіки зміни УК МС ПР для подальших досліджень).

➤ Модуль траєкторно-динамічної складової ТВ (необхідний для пошуку зміни моментів сил, що виникають в ланках МС, та відповідно пошуку часових та енергоємнісних показників згенерованих траєкторій).

6.2. Основні можливості та системні вимоги розробленого програмного продукту “Robix”

Розроблений програмний продукт "Robix" призначений для визначення параметрів векторно-проекційної, геометрично-силової та траєкторних-динамічної складових технологічної взаємодії S_x ПР з ОМ, автоматичного генерування траєкторій переміщення ТРК за опорними точками, розрахунку значень моментів в зчленуваннях ланок при відпрацюванні траєкторій, визначення швидкодії та енергоємності для кожної із синтезованих траєкторій, що апроксимовані кінцевою множиною сплайнів: кубічний (*cubic spline - C*), Акіми (*Akima's spline - A*) і лінійний (*linear spline - L*).

Основні *можливості* програмного продукту “Robix” наступні:

- формування 3D-сцени ГВК на базі ІМ S_x ПР, МС ПР, ОТО, ДТО, ОМ, ПР;
- автоматизоване визначення наявності та параметрів колізій;
- автоматизоване визначення множини параметрів сервісу (ТПС);
- розв'язування ПЗК та ЗЗК;
- планування траєкторій на множині проміжних опорних точок;
- автоматизоване розв'язування ПЗД;
- автоматизоване корегування колізійних траєкторій.

Системні вимоги щодо функціонування програмного продукту “Robix” наведені в таблиці 6.2.1.

Таблиця 6.2.1

Системні вимоги програмного продукту “Robix”

Параметри	Мінімальні	Рекомендовані
Операційна система	Windows XP із Service Pack 2	Windows 10
Центральний процесор	Pentium 4 2.5 GHz (однойдерний)	Intel Core 2 Duo чи AMD Athlon 64 X2
Об’єм оперативної пам’яті	1 GB	2 GB
Об’єм графічної пам’яті	512 Mb	1 GB

6.3. Опис інтерфейсу програмного продукту “Robix”

Для запуску програмного продукту необхідно двічі натиснути лівою клавішею миші по файлу “Robix.exe” в інструменті провідника Windows. Після запуску файлу “Robix.exe” на екрані висвічується головна екранна форма програми (рис. 6.3.1).

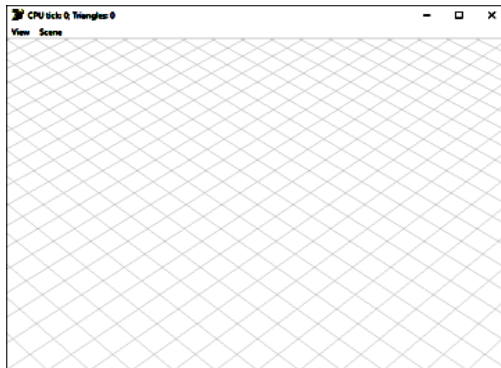


Рис. 6.3.1. Головна екранна форма програмного продукту “Robix”

У верхній лівій частині екранної форми головне меню програми має наступні пункти:

“**View**” – відповідає за відображення екранних форм модулів:

- “Local Time Control” – відображення форми зміни локального часу рухомих складових елементів 3D-сцени ГВК, наприклад, рухомих ланок МС ПР, що формуються автоматично за їх ІМ (рис. 6.3.2). Призначений для візуалізації положень ланки або декількох ланок МС ПР (визначаються прапорцем біля відповідних ланок “Link”) при регулюванні

(визначенні) повзунком частки кінематичного ресурсу (“Current Value”) активних ланок. При цьому початкова точка визначається ІМ ПР. Використовується як правило в інформаційних цілях.

- “Quaternion Calculator” – відображення форми розрахунку кватерніонів при формуванні інформаційних моделей складових ГВК (рис. 6.3.3). Робота з калькулятором кватерніонів подана нижче;

- “Practice” – відображення форми введення ІМ елементів ГВК, визначення складових ТВ та розрахунку параметрів τ , E заданої траєкторії (рис. 6.3.4). При цьому кожна ІМ складової ГВК вводиться у відповідному полі;

При закладці “Trajectory” висвічується екранна форма для побудови траєкторій за координатами опорних точок C_{t-1} , D_{t-1} , C_t , D_t та орієнтаціями S_x в цих точках (див. рис. 6.3.5). Координати вказаних точок визначаються автоматично після виконання кроків 3-14 п.7.

Активація закладки “Calculations” дає можливість отримати графіки зміни УК, їх швидкостей, прискорень, крутних моментів а також показників швидкодії та енергоємності (див. кроки 15-22 п.7). Приклад розрахунку та графічного представлення крутних моментів подано на рис. 6.3.6.

“**Scene**” – містить пункти швидкої зміни налаштувань сцени:

- “Reset view” – скидає поточне екранне відображення сцени, що певним чином не задовольняє користувача;

- “Show wireframe” – представляє всі елементи сцени нитковими (фреймовими) моделями.

Калькулятор кватерніонів за рис 6.3.3. призначений для виконання таких операцій над кватерніонами як: формування, множення, обернене перетворення.

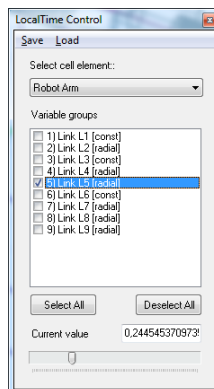


Рис. 6.3.2. Форма керування локальним часом рухомих елементів складових ГВК

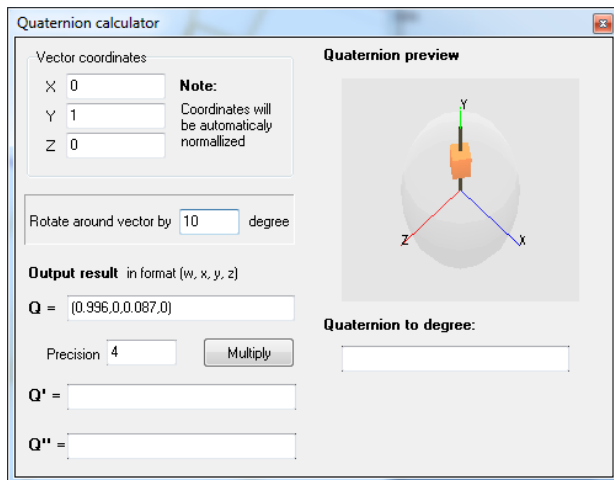


Рис. 6.3.3. Екранна форма калькулятора кватерніонів

Формування кватерніонів передбачає задання координат вектора в полях “Vector coordinates” та кута повороту навколо заданого вектора в поле “Rotate around by”. Отриманий результат з’являється в полі “Q”. Для зміни кількості значущих цифр при обчисленнях служить поле “Precision”. Наприклад, при “Precision = 4” розрахунки з врахуванням 0-ої цілої частини з точністю до 3-го знаку після коми, при “Precision = 3” до 2-го знаку після коми і т.д.

Множення кватерніонів активується кнопкою “Multiply” і означає множення кватерніонів, представлених в полях “Q” та “Q’ ” з точністю, вказаною в полі “Precision”. Результат операції множення відображається в полі “Q’ ”.

Операція оберненого перетворення кватерніонів означає для певним чином отриманого кватерніона, занесеного в поле “Quaternion to degree”, визначення його складових, а саме вектора та кута повороту навколо отриманого вектора. Ці дані формуються у відповідних полях “Vector coordinates” та “Rotate around by”. Фактично це операція, що є оберненою щодо операції формування кватерніону.

Доречно відмітити, що для умов роботизованих технологій операції:

– формування кватерніонів використовується при складанні ІМ за п. 6.4. Наприклад, для МС ПР, орієнтація кожної ланки описується саме формуванням кватерніона “Q” з відповідним індексом, що відповідає номеру ланки МС ПР;

– множення двох кватерніонів означає зміну орієнтації базового кватерніона “Q” за рахунок обертання навколо кватерніона “Q”. Як приклад, для МС ПР це означає, що аналізована ланка L_{i_L} описується кватерніоном “Q”, а ланка $L_{(i-1)_L}$ описується кватерніоном “Q”, обертання ланки L_{i_L} по відношенню до $L_{(i-1)_L}$ означає множення кватерніонів “Q” та “Q”, тобто $Q \cdot Q$, і як результат описується кватерніоном “Q”, що відображає орієнтацію ланки L_{i_L} в СК ланки $L_{(i-1)_L}$;

– оберненого перетворення кватерніонів на прикладі положень ланок МС ПР означає величину та знак (за чи проти годинникової стрілки) зміни УК ланки L_{i_L} по відношенню до ланки $L_{(i-1)_L}$.

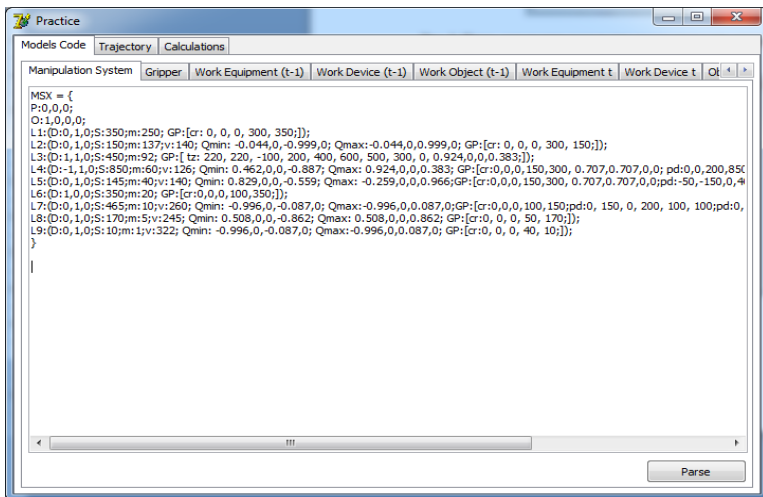


Рис. 6.3.4. Форма введення ІМ складових ГВК на прикладі ІМ МС ПР

Форма введення ІМ складових ГВК має наступні вкладки:

- “Manipulation System” – форма для введення ІМ МС ПР;
- “Gripper” – форма для введення ІМ Сх ПР;
- “Work Equipment (t-1)” – форма для введення ІМ ТО PP_{t-1} ;
- “Work Device (t-1)” – форма для введення ІМ Пр PP_{t-1} ;
- “Work Object (t-1)” – форма для введення у ІМ OM_{t-1} ;
- “Work Equipment (t)” – форма для введення ІМ ТО PP_t ;
- “Work Device (t)” – форма для введення ІМ Пр PP_t ;
- “Work Object (t)” – форма для введення у ІМ OM_t ;
- “Obstacle” – форма для введення параметрів перешкоди між PP_{t-1} та PP_t .

Після кожного введення відповідної ІМ у відповідне поле екранної форми слід натиснути кнопку “Parse” (розбір, аналіз) для побудови 3D-моделі (твердотільного еквіваленту) елемента ГВК.

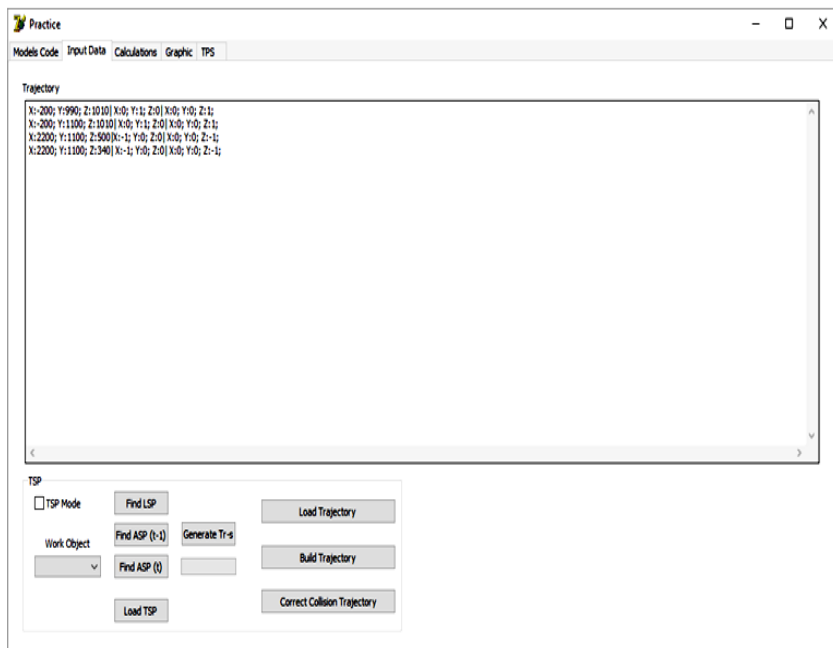


Рис. 6.3.5. Екранна форма даних для побудови траєкторії

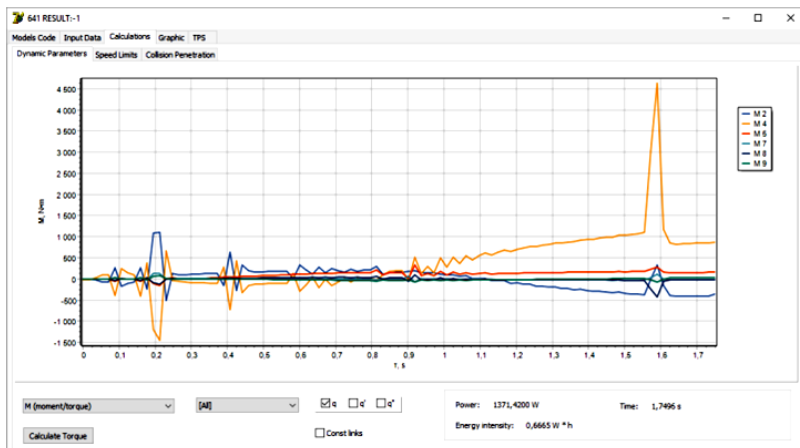


Рис. 6.3.6. Экранна форма розрахованих моментів в ланках МС ПР
(приклад)

6.4. Інструкція користувача щодо формування ІМ складових ГВК

6.4.1. Формування ІМ ПР мод. КУКА KR-30

6.4.1.1. Загальна інформація

Нижче проілюстровано складання ІМ МС ПР мод. КУКА KR-30 (див. рис. 6.4.1.1.1) для подальшої роботи із програмним продуктом “Robix”.

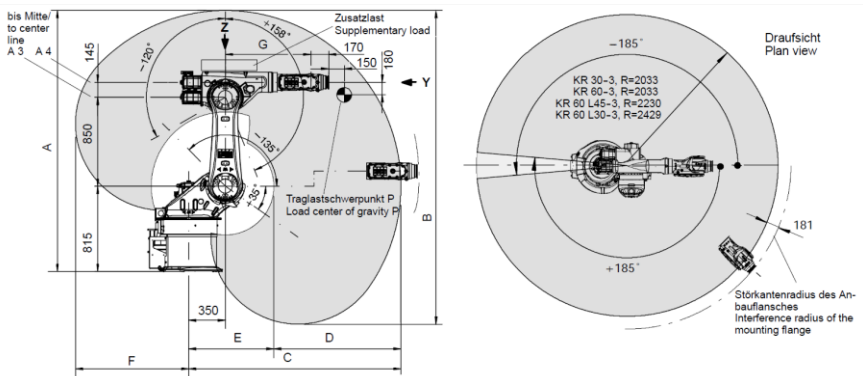


Рис. 6.4.1.1.1. Схема МС ПР мод. КУКА KR-30
за паспортними даними

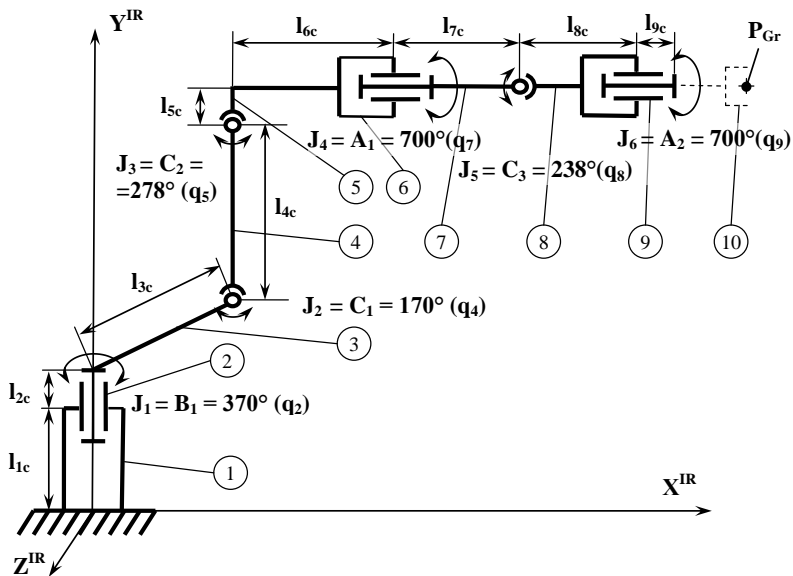


Рис. 6.4.1.1.2. Кінематична структура МС ПР мод. KUKA KR-30

6.4.1.2. Опис ланки 1 МС ПР мод. KUKA KR-30

(KUKA KR-30) = {
 L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);

}

Тут:

(KUKA KR-30) – назва МС ПР

L1 – ланка 1 в МС ПР

D: 0, 1, 0 – вектор напрямку ланки L1 в СК МС ПР

— розташування L1 вздовж осі Z^{IR}
 — розташування L1 вздовж осі Y^{IR}
 — розташування L1 вздовж осі X^{IR}

S:350 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L1

— довжина ланки L1, мм

M:250 – маса ланки L1, кг

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

CR: 0, 0, 0, 300, 350 – геометричний примітив типу “циліндр”

- L – довжина циліндра, мм
- R – радіус циліндра, мм
- розташування вздовж осі Z в СК ланки L1, мм
- розташування вздовж осі Y в СК ланки L1, мм
- розташування вздовж осі X в СК ланки L1, мм
- ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

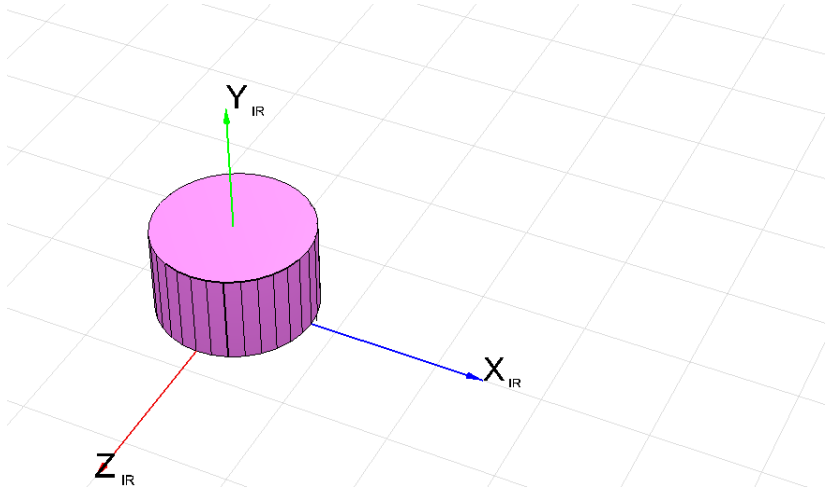


Рис. 6.4.1.2.1. 3D-твёрдотельная модель ланки L1 МС ПР мод. KUKA KR-30

6.4.1.3. Опис ланки 2 МС ПР мод. KUKA KR-30

(KUKA KR-30) = {

L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);

L2:(D:0,1,0;S:150;M:137;V:140;Q_{min}: -0.044,0,-0.999,0;

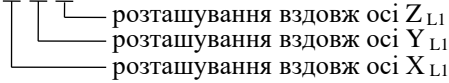
Q_{max}:-0.044,0,0.999,0; GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 150;]);

}

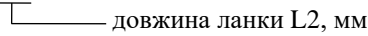
Тут:

L2 – ланка 2 в МС ПР

D: 0, 1, 0 – вектор напрямку ланки L2 в СК ланки L1



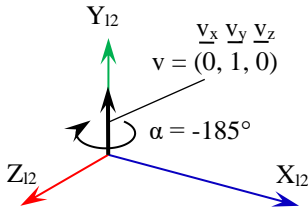
S:150 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L2



M:137 – маса ланки L2, кг

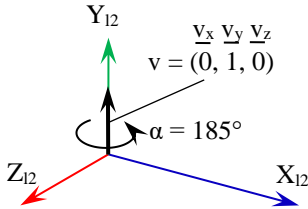
V:140 – максимальна швидкість переміщення ланки L2, °/с

Q_{\min} : -0.044, 0, -0.999, 0 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L2 в її СК



$$\begin{aligned} Q_{\min} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\ &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\ &= \left(\cos \frac{-185^\circ}{2}, \right. \\ &0 \cdot \sin \frac{-185^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-185^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-185^\circ}{2} \left. \right) = \\ &= \left(\cos(-92,5^\circ), 0, \sin(-92,5^\circ), 0 \right) = \\ &= (-0.044, 0, -0.999, 0) \end{aligned}$$

Q_{\max} : -0.044, 0, 0.999, 0 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L2 в її СК



$$\begin{aligned} Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\ &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\ &= \left(\cos \frac{185^\circ}{2}, \right. \\ &0 \cdot \sin \frac{185^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{185^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{185^\circ}{2} \left. \right) = \\ &= \left(\cos(92,5^\circ), 0, \sin(92,5^\circ), 0 \right) = \\ &= (-0.044, 0, 0.999, 0) \end{aligned}$$

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

CR: 0, 0, 0, 300, 150 – геометричний примітив типу “циліндр”

- L – довжина циліндра, мм
- R – радіус циліндра, мм
- розташування вздовж осі Z в СК ланки L2, мм
- розташування вздовж осі Y в СК ланки L2, мм
- розташування вздовж осі X в СК ланки L2, мм
- ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

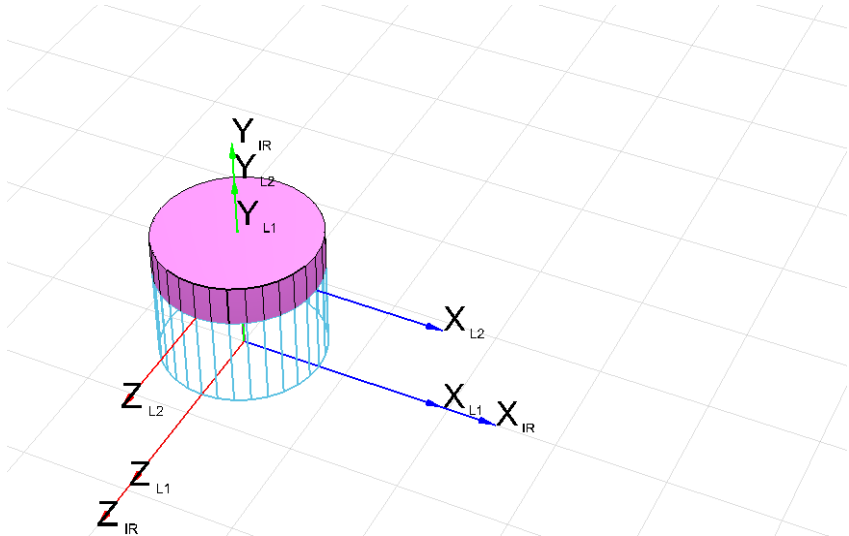


Рис. 6.4.1.3.1. 3D-твёрдотельная модель ланки L2 МС ПР мод. KUKA KR-30

6.4.1.4. Опис ланки 3 МС ПР мод. KUKA KR-30

```
(KUKA KR-30) = {
  L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);
  L2:(D:0,1,0;S:150;M:137;V:140;Qmin: -0.044,0,-0.999,0;
    Qmax:-0.044,0,0.999,0; GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 150;]);
  L3:(D:1,1,0;S:450;M:92;GP:[ TZ: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0,
    0.924,0,0,0.383;]);
}
```

Тут:

L3 – ланка 3 в МС ПР

D: 1, 1, 0 – вектор напрямку ланки L3 в СК ланки L2

└─ розташування вздовж осі Z_{L2}
└─ розташування вздовж осі Y_{L2}
└─ розташування вздовж осі X_{L2}

S:450 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L3

└─ довжина ланки L3, мм

M:92 – маса ланки L3, кг

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

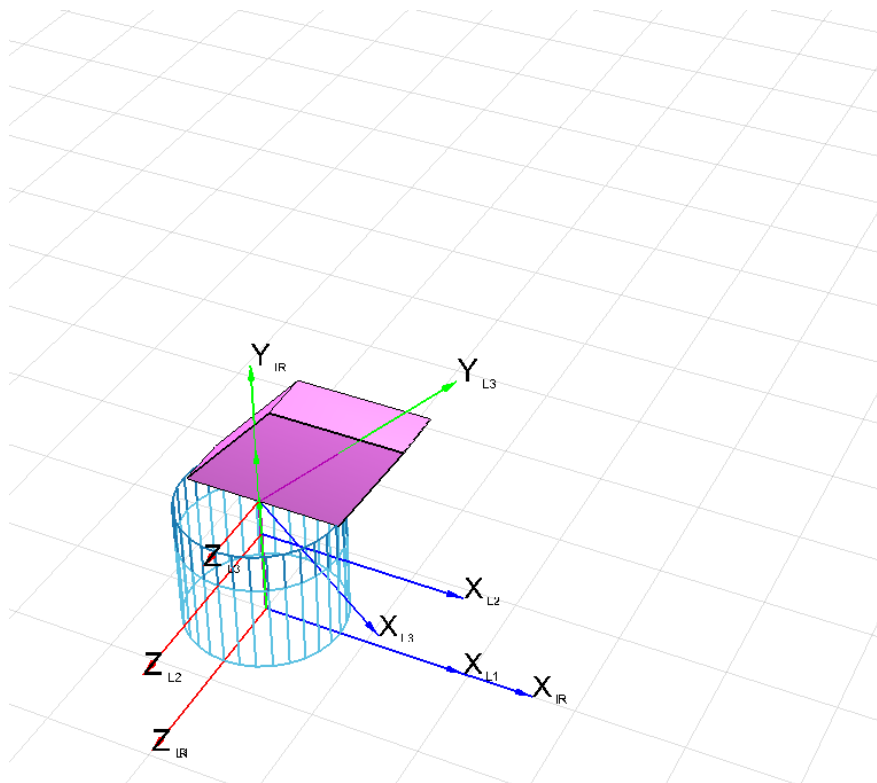


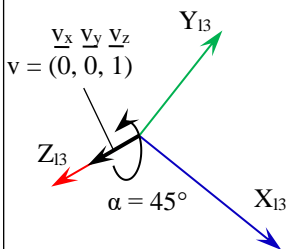
Рис. 6.4.1.4.1. 3D-твёрдотельная модель ланки L3 МС ПР мод. КУКА KR-30

TZ: – геометричний примітив типу “трапеція”

ідентифікатор примітиву TZ (Trapeze) – “ трапеція”

TZ: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0, 0.924, 0, 0, 0.383

0.924, 0, 0, 0.383 – кватерніон орієнтації трапеції



$$\begin{aligned}
 Q_{TZ} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{45^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{45^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{45^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{45^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(22,5^\circ), 0, 0, \sin(22,5^\circ) \right) = \\
 &= (0.924, 0, 0, 0.383)
 \end{aligned}$$

200, 400, 600, 500, 300, 0

b – зміщення висоти H2, мм
a – зміщення висоти H1, мм
H2 – права висота трапеції, мм
H1 – ліва висота трапеції, мм
W – довжина трапеції вздовж
вектора напрямку, мм
D – глибина трапеції, мм

220, 220, -100

розташування вздовж осі Z в СК ланки L3, мм
розташування вздовж осі Y в СК ланки L3, мм
розташування вздовж осі X в СК ланки L3, мм

6.4.1.5. Опис ланки 4 МС ПР мод. KUKA KR-30

(KUKA KR-30) = {

L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);

L2:(D:0,1,0;S:150;M:137;V:140;Q_{min}:-0.044,0,-0.999,0;

Q_{max}:-0.044,0,0.999,0; GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 150;]);

L3:(D:1,1,0;S:450;M:92;GP:[TZ: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0, 0.924,0,0,0.383;]);

L4:(D:-1,1,0;S:850;M:60;V:126;Q_{min}: 0.462,0,0,-0.887;

Q_{max}: 0.924,0,0,0.383; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0;

PD:0,0,200,850,250,200;]);

}

Тут:

L4 – ланка 4 в МС ПР

D: -1, 1, 0 – вектор напрямку ланки L4 в СК ланки L3

└─ розташування вздовж осі Z_{L3}
└─ розташування вздовж осі Y_{L3}
└─ розташування вздовж осі X_{L3}

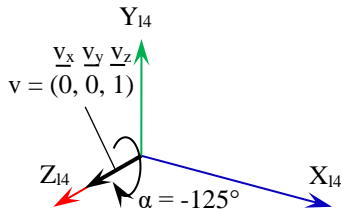
S:850 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L4

└─ довжина ланки L4, мм

M:60 – маса ланки L4, кг

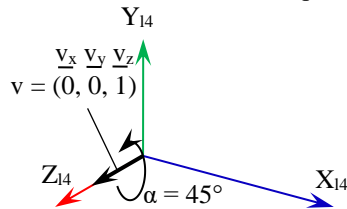
V:126 – максимальна швидкість переміщення ланки L4, °/с

Q_{\min} : 0.462,0,0,-0.887 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L4 в її СК



$$\begin{aligned} Q_{\min} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\ &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\ &= \left(\cos \frac{-125^\circ}{2}, \right. \\ &0 \cdot \sin \frac{-125^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-125^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-125^\circ}{2} \left. \right) = \\ &= \left(\cos(-62,5^\circ), 0, 0, \sin(-62,5^\circ) \right) = \\ &= (0.462, 0, 0, -0.887) \end{aligned}$$

Q_{\max} : 0.924,0,0,0.383 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L4 в її СК



$$\begin{aligned} Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\ &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\ &= \left(\cos \frac{45^\circ}{2}, \right. \\ &0 \cdot \sin \frac{45^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{45^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{45^\circ}{2} \left. \right) = \\ &= \left(\cos(22,5^\circ), 0, 0, \sin(22,5^\circ) \right) = \\ &= (0.924, 0, 0, 0.383) \end{aligned}$$

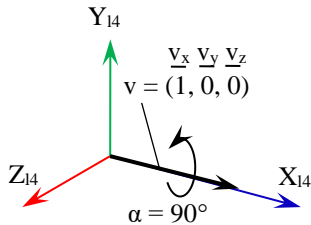
GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

CR:– геометричний примітив типу “циліндр”

ідентифікатор примітиву CR (Cylinder) – “циліндр”

CR: 0, 0, 0, 150, 300, 0.707, 0.707, 0, 0

0.707, 0.707, 0, 0 – кватерніон орієнтації циліндра



$$\begin{aligned}
 Q_{Cr} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right. \\
 & \left. 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos(45^\circ), \sin(45^\circ), 0, 0 \right) = \\
 &= (0.707, 0.707, 0, 0)
 \end{aligned}$$

0, 0, 0, 150, 300

L – довжина циліндру, мм

R – радіус циліндру, мм

розташування вздовж осі Z в СК ланки L4, мм

розташування вздовж осі Y в СК ланки L4, мм

розташування вздовж осі X в СК ланки L4, мм

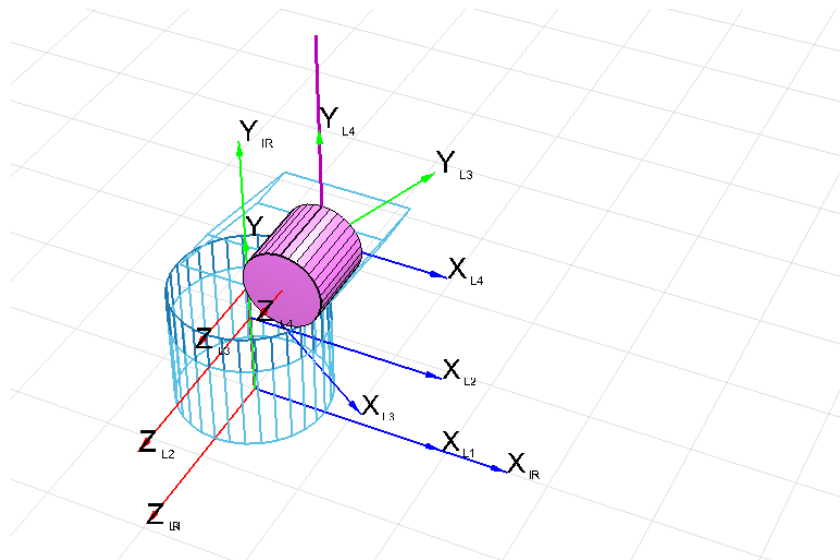


Рис. 6.4.1.5.1. 3D-твердотільна модель ланки L4 МС ПР мод. KUKA KR-30 (примітив – циліндр)

PD: 0,0,200,850,250,200 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

- D – глибина паралелепіпеда, мм
- H – висота паралелепіпеда, мм
- W – ширина паралелепіпеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК ланки L4, мм
- розташування вздовж осі Y в СК ланки L4, мм
- розташування вздовж осі X в СК ланки L4, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

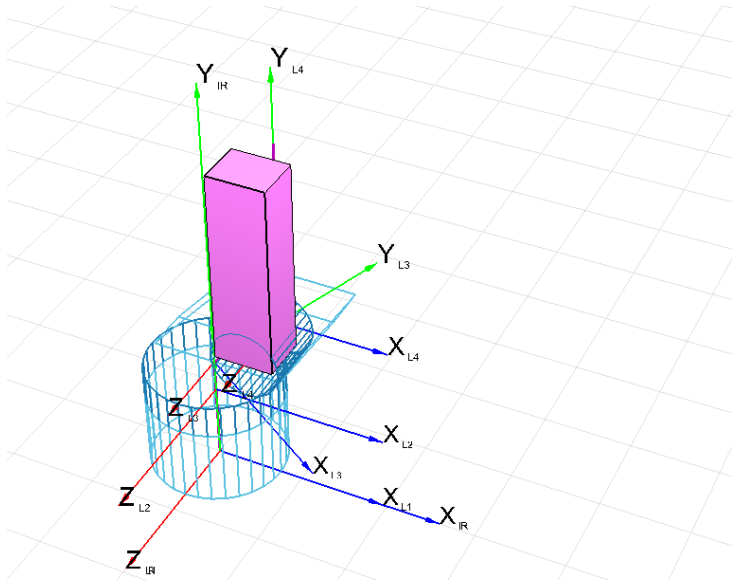


Рис. 6.4.1.5.2. 3D-твёрдотельная модель ланки L4 MC ПР мод. KUKA KR-30 (примитив – паралелепипед)

6.4.1.6. Опис ланки 5 MC ПР мод. KUKA KR-30

(KUKA KR-30) = {

- L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);
- L2:(D:0,1,0;S:150;M:137;V:140;Q_{min}: -0.044,0,-0.999,0;
Q_{max}:-0.044,0,0.999,0; GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 150;]);
- L3:(D:1,1,0;S:450;M:92;GP:[TZ: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0,
0.924,0,0,0.383;]);
- L4:(D:-1,1,0;S:850;M:60;V:126;Q_{min}: 0.462,0,0,-0.887;
Q_{max}: 0.924,0,0,0.383; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0;
PD:0,0,200,850,250,200;]);

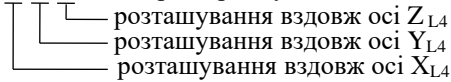
L5:(D:0,1,0;S:145;M:40;V:140; Q_{min}: 0.829,0,0,-0.559; Q_{max}: -0.259,0,0,0.966; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0; PD:-50,-150,0,400,500,200;]);

}

Тут:

L5 – ланка 5 в МС ПР

D: 0, 1, 0 – вектор напрямку ланки L5 в СК ланки L4



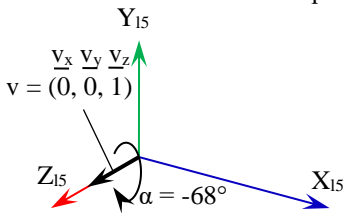
S:145 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L5

— довжина ланки L5, мм

M:40 – маса ланки L5, кг

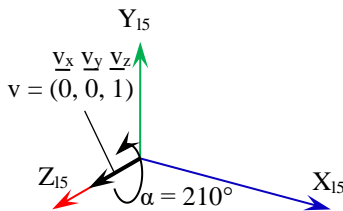
V:140 – максимальна швидкість переміщення ланки L5, °/с

Q_{min}: 0.829, 0, 0, -0.559 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L5 в її СК



$$\begin{aligned}
 Q_{\min} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{-68^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{-68^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-68^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-68^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(-34^\circ), 0, 0, \sin(-34^\circ) \right) = \\
 &= (0.829, 0, 0, -0.559)
 \end{aligned}$$

Q_{max}: -0.259, 0, 0, 0.966 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L5 в її СК



$$\begin{aligned}
 Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{210^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{210^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{210^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{210^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(105^\circ), 0, 0, \sin(105^\circ) \right) = \\
 &= (-0.259, 0, 0, 0.966)
 \end{aligned}$$

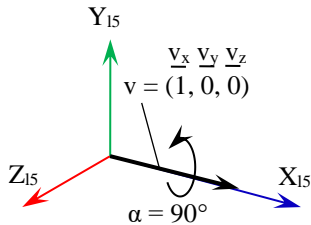
GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

CR:– геометричний примітив типу “циліндр”

ідентифікатор примітиву CR (Cylinder) – “циліндр”

CR: 0, 0, 0, 150, 300, 0.707, 0.707, 0, 0

0.707, 0.707, 0, 0; – кватерніон орієнтації циліндра



$$\begin{aligned}
 Q_{Cr} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right. \\
 & \left. 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos(45^\circ), \sin(45^\circ), 0, 0 \right) = \\
 &= (0.707, 0.707, 0, 0)
 \end{aligned}$$

0, 0, 0, 150, 300

L – довжина циліндра, мм

R – радіус циліндра, мм

розташування вздовж осі Z в СК ланки L5, мм

розташування вздовж осі Y в СК ланки L5, мм

розташування вздовж осі X в СК ланки L5, мм

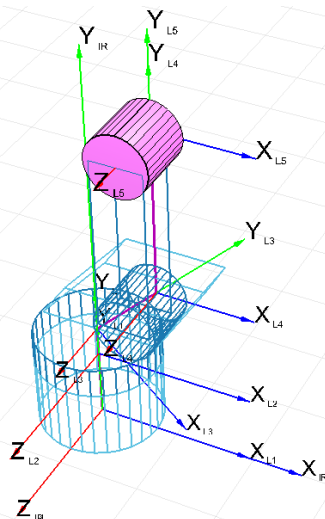


Рис. 6.4.1.6.1. 3D-твердотільна модель ланки L5 МС ПР мод. КУКА KR-30 (примітив – циліндр)

PD: -50, -150, 0, 400, 500, 200 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

- D – глибина паралелепіпеда, мм
- H – висота паралелепіпеда, мм
- W – ширина паралелепіпеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК ланки L5, мм
- розташування вздовж осі Y в СК ланки L5, мм
- розташування вздовж осі X в СК ланки L5, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

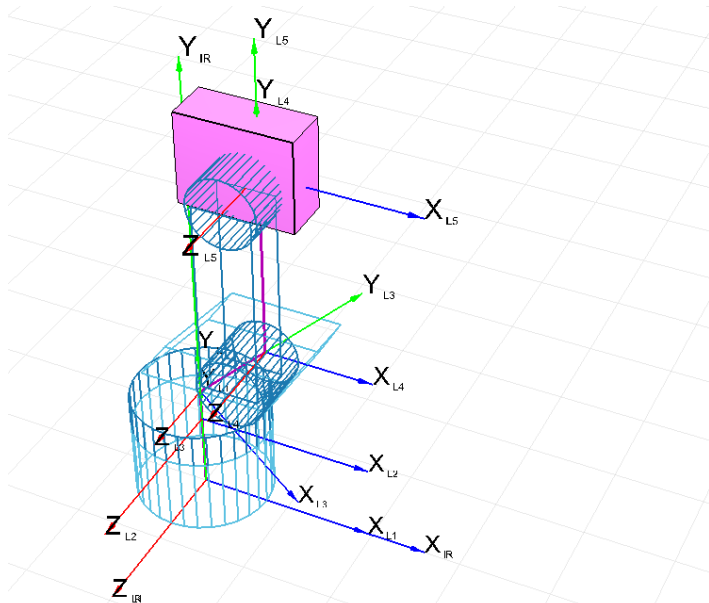


Рис. 6.4.1.6.2. 3D-твёрдотельная модель ланки L5 МС ПР мод. KUKA KR-30 (примітив – паралелепіпед)

6.4.1.7. Опис ланки 6 МС ПР мод. KUKA KR-30

(KUKA KR-30) = {

- L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);
- L2:(D:0,1,0;S:150;M:137;V:140;Q_{min}: -0.044,0,-0.999,0;
Q_{max}:-0.044,0,0.999,0; GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 150;]);
- L3:(D:1,1,0;S:450;M:92;GP:[TZ: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0,
0.924,0,0,0.383;]);
- L4:(D:-1,1,0;S:850;M:60;V:126;Q_{min}: 0.462,0,0,-0.887;
Q_{max}: 0.924,0,0,0.383; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0;
PD:0,0,200,850,250,200;]);

```

L5:(D:0,1,0;S:145;M:40;V:140; Qmin: 0.829,0,0,-0.559; Qmax: -
    0.259,0,0,0.966; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0; PD:-50,-
    150,0,400,500,200;]);
L6:(D:1,0,0;S:350;M:20;GP:[CR:0,0,0,100,350;]);
}

```

Тут:

L6 – ланка 6 в МС ПР

D: 1, 0, 0 – вектор напрямку ланки L6 в СК ланки L5

└─ розташування вздовж осі Z_{L5}
 └─ розташування вздовж осі Y_{L5}
 └─ розташування вздовж осі X_{L5}

S:350 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L6

└─ довжина ланки L6, мм

M:20 – маса ланки L6, кг

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

CR: 0, 0, 0, 100, 350 – геометричний примітив типу “циліндр”

└─ L – довжина циліндра, мм
 └─ R – радіус циліндра, мм
 └─ розташування вздовж осі Z в СК ланки L6, мм
 └─ розташування вздовж осі Y в СК ланки L6, мм
 └─ розташування вздовж осі X в СК ланки L6, мм
 └─ ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

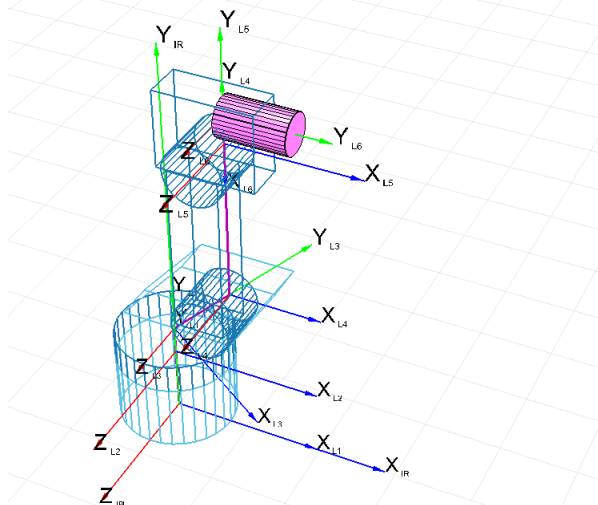


Рис. 6.4.1.7.1. 3D-твёрдотельная модель ланки L6 МС ПР мод. KUKA KR-30

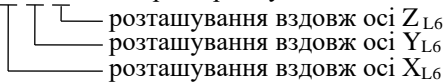
6.4.1.8. Опис ланки 7 МС ПР мод. KUKA KR-30

(KUKA KR-30) = {
 L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);
 L2:(D:0,1,0;S:150;M:137;V:140;Q_{min}: -0.044,0,-0.999,0;
 Q_{max}:-0.044,0,0.999,0; GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 150;]);
 L3:(D:1,1,0;S:450;M:92;GP:[TZ: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0,
 0.924,0,0,0.383;]);
 L4:(D:-1,1,0;S:850;M:60;V:126;Q_{min}: 0.462,0,0,-0.887;
 Q_{max}: 0.924,0,0,0.383; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0;
 PD:0,0,200,850,250,200;]);
 L5:(D:0,1,0;S:145;M:40;V:140; Q_{min}: 0.829,0,0,-0.559; Q_{max}: -
 0.259,0,0,0.966; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0; PD:-50,-
 150,0,400,500,200;]);
 L6:(D:1,0,0;S:350;M:20;GP:[CR:0,0,0,100,350;]);
 L7:(D:0,1,0;S:465;M:10;V:260;Q_{min}: -0.996,0,-0.087,0;
 Q_{max}:-0.996,0,0.087,0; GP:[CR:0,0,0,100,150; PD:0,150,0,200,100,100;
 PD:0,310,-60,200,100,30; PD:0,310,60,200,100,30;]);
 }

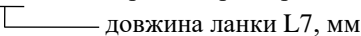
Тут:

L7 – ланка 7 в МС ПР

D: 0, 1, 0 – вектор напрямку ланки L7 в СК ланки L6



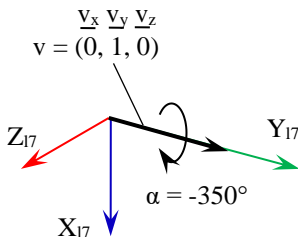
S:465 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L7



M:10 – маса ланки L7, кг

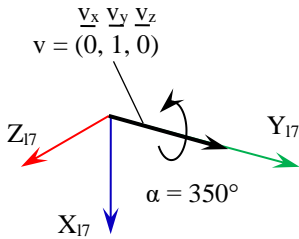
V:260 – максимальна швидкість переміщення ланки L7, °/с

Q_{min}: -0.996, 0, -0.087, 0 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L7 в її СК



$$\begin{aligned}
 Q_{\min} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{-350^\circ}{2}, \right. \\
 &\quad \left. 0 \cdot \sin \frac{-350^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-350^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-350^\circ}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos(-175^\circ), 0, 0, \sin(-175^\circ) \right) = \\
 &= (-0.996, 0, -0.087, 0)
 \end{aligned}$$

Q_{\max} : -0.996, 0, 0.087, 0 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L7 в її СК



$$\begin{aligned}
 Q_{\min} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{350^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{350^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{350^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{350^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(175^\circ), 0, 0, \sin(175^\circ) \right) = \\
 &= (-0.996, 0, 0.087, 0)
 \end{aligned}$$

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

CR: 0, 0, 0, 100, 150 – геометричний примітив типу “циліндр”

- L – довжина циліндра, мм
- R – радіус циліндра, мм
- розташування вздовж осі Z в СК ланки L7, мм
- розташування вздовж осі Y в СК ланки L7, мм
- розташування вздовж осі X в СК ланки L7, мм
- ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

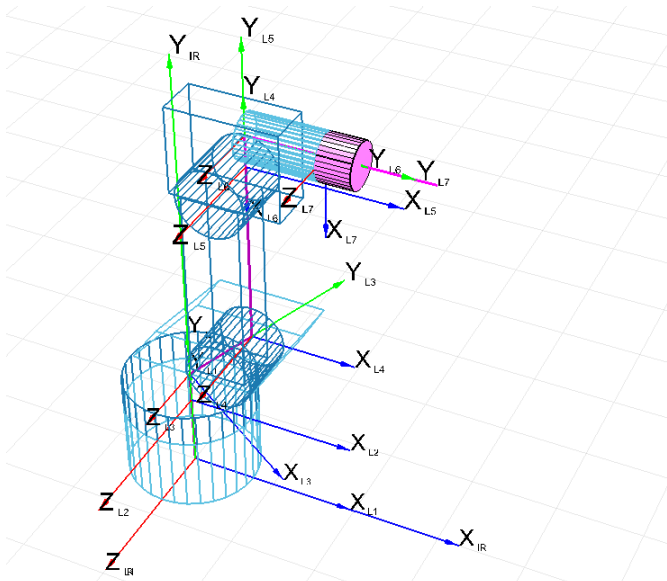
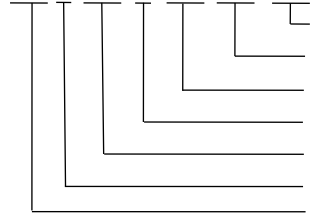


Рис. 6.4.1.8.1. 3D-твердотільна модель ланки L7 МС ПР мод. KUKA KR-30 (примітив – циліндр)

PD: 0, 150, 0, 200, 100, 100 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм

H – висота паралелепіпеда, мм

W – ширина паралелепіпеда, мм

розташування вздовж осі Z в СК ланки L7, мм

розташування вздовж осі Y в СК ланки L7, мм

розташування вздовж осі X в СК ланки L7, мм

ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

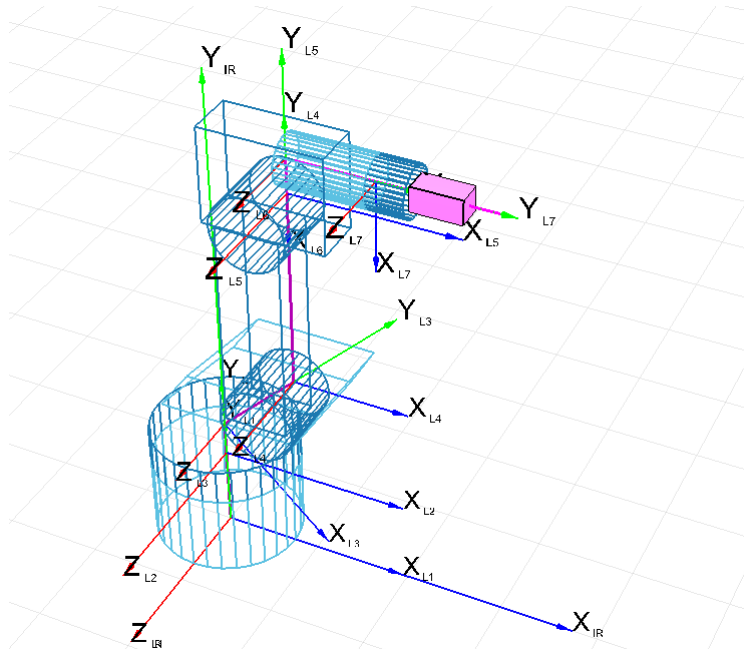
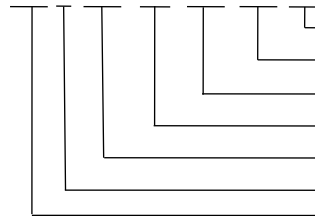


Рис. 6.4.1.8.2. 3D-твердотільна модель ланки L7 МС ПР мод. KUKA KR-30 (примітив – паралелепіпед)

PD: 0, 310, -60, 200, 100, 30 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм

H – висота паралелепіпеда, мм

W – ширина паралелепіпеда, мм

розташування вздовж осі Z в СК ланки L7, мм

розташування вздовж осі Y в СК ланки L7, мм

розташування вздовж осі X в СК ланки L7, мм

ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

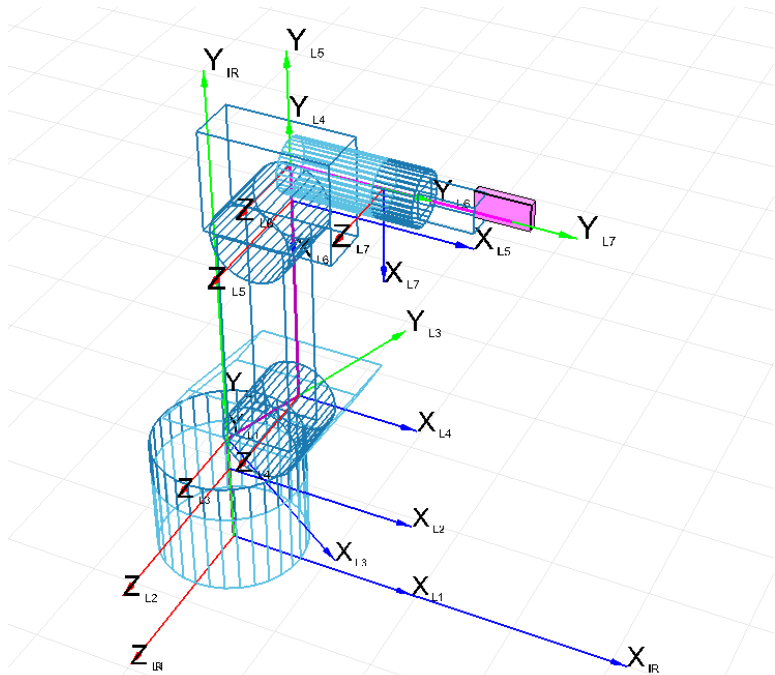


Рис. 6.4.1.8.3. 3D-твердотільна модель ланки L7 МС ПР мод. KUKA KR-30 (примітив – паралелепіпед)

PD: 0, 310, 60, 200, 100, 30 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

	D – глибина паралелепіпеда, мм
	H – висота паралелепіпеда, мм
	W – ширина паралелепіпеда, мм
	розташування вздовж осі Z в СК ланки L7, мм
	розташування вздовж осі Y в СК ланки L7, мм
	розташування вздовж осі X в СК ланки L7, мм
	ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

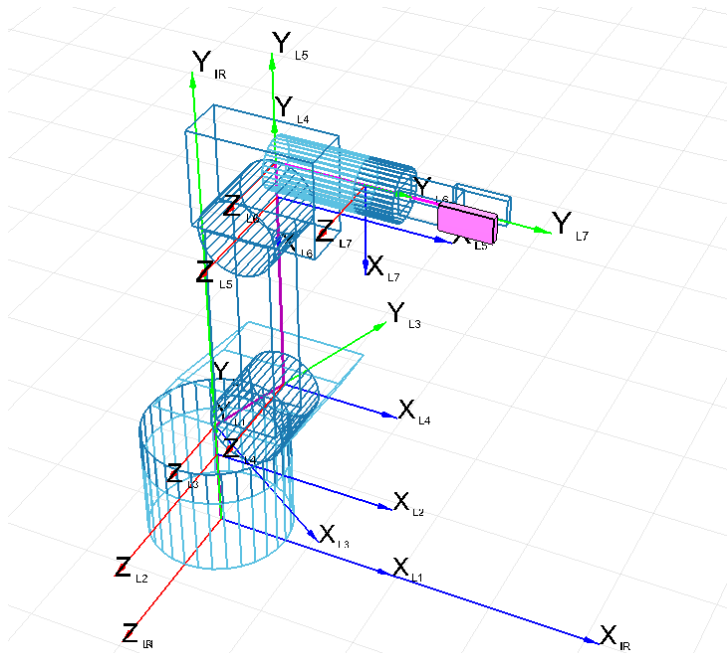


Рис. 6.4.1.8.4. 3D-твердотільна модель ланки L7 МС ПР мод. KUKA KR-30 (примітив – паралелепіпед)

6.4.1.9. Опис ланки 8 МС ПР мод. KUKA KR-30

(KUKA KR-30) = {
 L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);
 L2:(D:0,1,0;S:150;M:137;V:140;Q_{min}: -0.044,0,-0.999,0;
 Q_{max}:-0.044,0,0.999,0; GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 150;]);
 L3:(D:1,1,0;S:450;M:92;GP:[TZ: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0,
 0.924,0,0,0.383;]);
 L4:(D:-1,1,0;S:850;M:60;V:126;Q_{min}: 0.462,0,0,-0.887;
 Q_{max}: 0.924,0,0,0.383; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0;
 PD:0,0,200,850,250,200;]);
 L5:(D:0,1,0;S:145;M:40;V:140; Q_{min}: 0.829,0,0,-0.559; Q_{max}: -
 0.259,0,0,0.966; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0; PD:-50,-
 150,0,400,500,200;]);
 L6:(D:1,0,0;S:350;M:20;GP:[CR:0,0,0,100,350;]);
 L7:(D:0,1,0;S:465;M:10;V:260;Q_{min}: -0.996,0,-0.087,0;
 Q_{max}:-0.996,0,0.087,0; GP:[CR:0,0,0,100,150; PD:0,150,0,200,100,100;
 PD:0,310,-60,200,100,30; PD:0,310,60,200,100,30;]);
 L8:(D:0,1,0;S:170;M:5;V:245;Q_{min}: 0.508,0,0,-0.862; Q_{max}:
 0.508,0,0,0.862; GP:[CR:0,0,0,50,170;]); }

Тут:

L8 – ланка 8 в МС ПР

D: 0, 1, 0 – вектор напрямку ланки L8 в СК ланки L7

┌ розташування вздовж осі Z_{L7}
├ розташування вздовж осі Y_{L7}
└ розташування вздовж осі X_{L7}

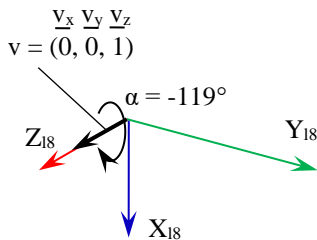
S:170 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L8

└ довжина ланки L8, мм

M:5 – маса ланки L8, кг

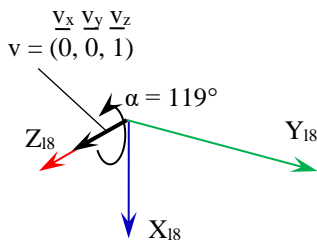
V:245 – максимальна швидкість переміщення ланки L8, °/с

Q_{\min} : 0.508, 0, 0, -0.862 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L8 в її СК



$$\begin{aligned} Q_{\min} = (s, v) &= (s, v_x, v_y, v_z) = \\ &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\ &= \left(\cos \frac{-119^\circ}{2}, \right. \\ &\quad \left. 0 \cdot \sin \frac{-119^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-119^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-119^\circ}{2} \right) = \\ &= (\cos(-59,5^\circ), 0, 0, \sin(-59,5^\circ)) = \\ &= (0.508, 0, 0, -0.862) \end{aligned}$$

Q_{\max} : 0.508, 0, 0, 0.862 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L8 в її СК



$$\begin{aligned} Q_{\min} = (s, v) &= (s, v_x, v_y, v_z) = \\ &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\ &= \left(\cos \frac{119^\circ}{2}, \right. \\ &\quad \left. 0 \cdot \sin \frac{119^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{119^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{119^\circ}{2} \right) = \\ &= (\cos(59,5^\circ), 0, 0, \sin(59,5^\circ)) = \\ &= (0.508, 0, 0, 0.862) \end{aligned}$$

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

CR: 0, 0, 0, 50, 170 – геометричний примітив типу “циліндр”

- L – довжина циліндра, мм
- R – радіус циліндра, мм
- розташування вздовж осі Z в СК ланки L8, мм
- розташування вздовж осі Y в СК ланки L8, мм
- розташування вздовж осі X в СК ланки L8, мм
- ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

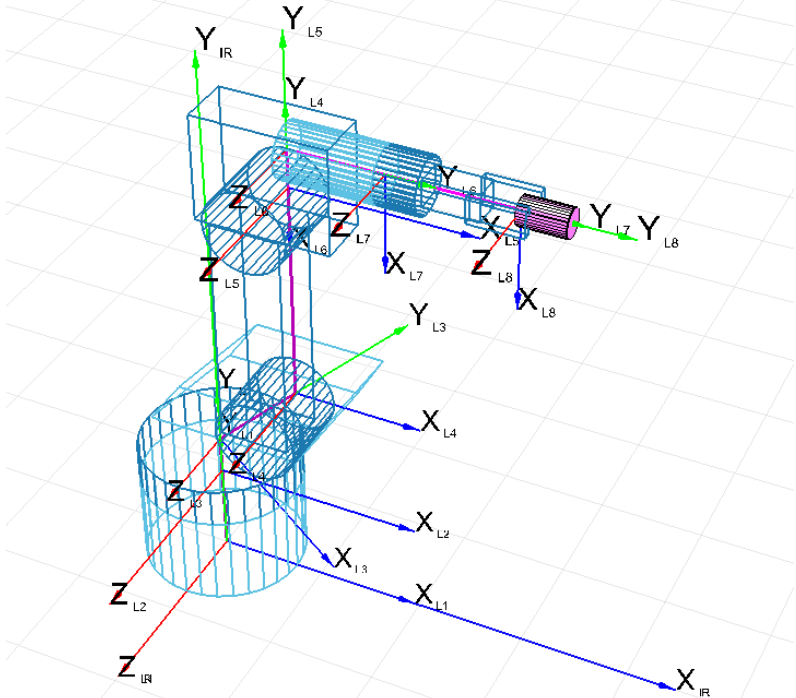


Рис. 6.4.1.9.1. 3D-твердотільна модель ланки L8 МС ПР мод. KUKA KR-30

6.4.1.10. Опис ланки 9 МС ПР мод. KUKA KR-30

(KUKA KR-30) = {

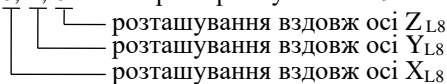
- L1:(D:0,1,0;S:350;M:250;GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 350;]);
- L2:(D:0,1,0;S:150;M:137;V:140;Q_{min}: -0.044,0,-0.999,0;
Q_{max}:-0.044,0,0.999,0; GP:[CR: 0, 0, 0, 300, 150;]);
- L3:(D:1,1,0;S:450;M:92;GP:[TZ: 220, 220, -100, 200, 400, 600, 500, 300, 0,
0.924,0,0,0.383;]);
- L4:(D:-1,1,0;S:850;M:60;V:126;Q_{min}: 0.462,0,0,-0.887;
Q_{max}: 0.924,0,0,0.383; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0;
PD:0,0,200,850,250,200;]);

L5:(D:0,1,0;S:145;M:40;V:140; Q_{min}: 0.829,0,0,-0.559; Q_{max}: -0.259,0,0,0.966; GP:[CR:0,0,0,150,300, 0.707,0.707,0,0; PD:-50,-150,0,400,500,200;]);
 L6:(D:1,0,0;S:350;M:20;GP:[CR:0,0,0,100,350;]);
 L7:(D:0,1,0;S:465;M:10;V:260;Q_{min}: -0.996,0,-0.087,0; Q_{max}:-0.996,0,0.087,0; GP:[CR:0,0,0,100,150; PD:0,150,0,200,100,100; PD:0,310,-60,200,100,30; PD:0,310,60,200,100,30;]);
 L8:(D:0,1,0;S:170;M:5;V:245;Q_{min}: 0.508,0,0,-0.862; Q_{max}: 0.508,0,0,0.862; GP:[CR:0,0,0,50,170;]);
 L9:(D:0,1,0;S:10;M:1;V:322;Q_{min}: -0.996,0,-0.087,0; Q_{max}:-0.996,0,0.087,0; GP:[CR:0,0,0,40,10;]);
 }

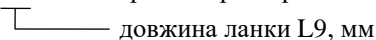
Тут:

L9 – ланка 9 в МС ПР

D: 0, 1, 0 – вектор напрямку ланки L9 в СК ланки L8



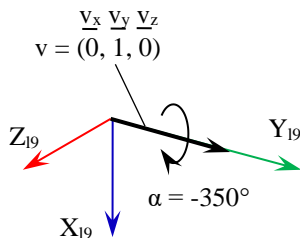
S:10 – геометричний розмір ниткового представлення ланки L9



M:5 – маса ланки L9, кг

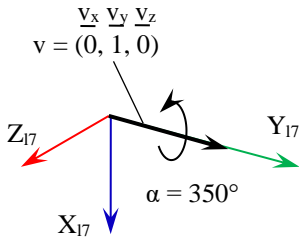
V:245 – максимальна швидкість переміщення ланки L9, °/с

Q_{min}: -0.996, 0, -0.087, 0 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L9 в її СК



$$\begin{aligned}
 \mathbf{v} &= (v_x, v_y, v_z) = (0, 1, 0) \\
 \mathbf{Q}_{\min} &= (s, \mathbf{v}) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{-119^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{-119^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-119^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-119^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(-59,5^\circ), 0, 0, \sin(-59,5^\circ) \right) = \\
 &= (-0.996, 0, -0.087, 0)
 \end{aligned}$$

Q_{\max} : -0.996, 0, 0.087, 0 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) ланки L9 в її СК



$$\begin{aligned}
 Q_{\min} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{350^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{350^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{350^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{350^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(175^\circ), 0, 0, \sin(175^\circ) \right) = \\
 &= (-0.996, 0, 0.087, 0)
 \end{aligned}$$

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ланки МС ПР

CR: 0, 0, 0, 40, 10 – геометричний примітив типу “циліндр”

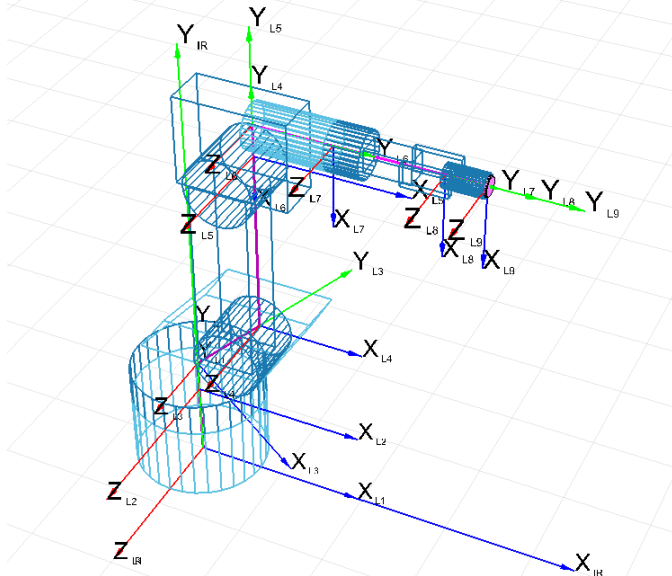
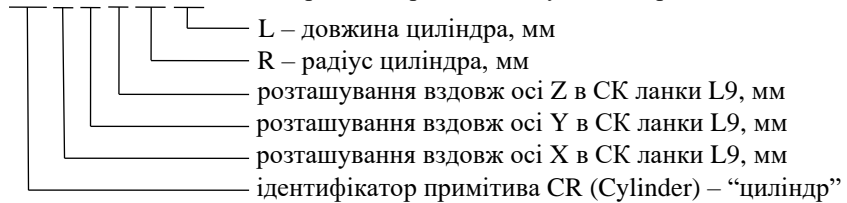


Рис. 6.4.1.10.1. 3D-твердотільна модель ланки L9 МС ПР мод. KUKA KR-30

6.4.2. Формування ІМ Сх мод. Schunk LGR 32

6.4.2.1. Загальна інформація

Нижче проілюстровано складання ІМ Сх на прикладі формалізованого опису Сх мод. Schunk LGR 32 (див. рис. 6.4.2.1.1) для подальшої роботи із програмним продуктом “Robix”.

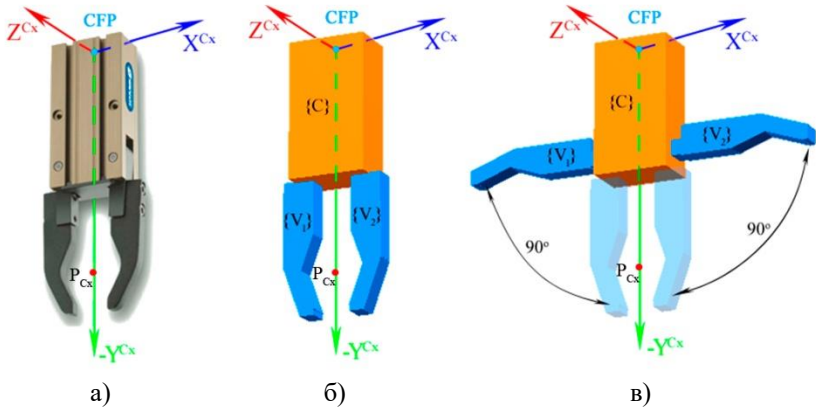


Рис. 6.4.2.1.1. Обертальний пневматичний Сх моделі “LGR 32” з двома затискними елементами, виробника фірми Schunk (Німеччина):

- конструктивний оригінал;
- 3D-еквівалент (твердотільна модель) – повний затиск;
- 3D-еквівалент (твердотільна модель) – повний розтиск

6.4.2.2. Опис точки кріплення СхПР до МС ПР

```
Gripper(LGR 32) = {  
    M(2)  
    CFP[(0, 0, 0)(0.707,0,0,0.707)]  
}
```

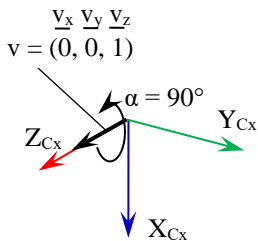
Тут:

(LGR 32) – модель СхПР

M(2) ідентифікатор та значення маси СхПР, кг

CFP[(0, 0, 0)(0.707,0,0,0.707)] – координати точки кріплення Сх ПР до останньої ланки МС ПР

0.707, 0, 0, 0.707 – кватерніон орієнтації СК Сх ПР в СК останньої ланки МС ПР



$$\begin{aligned}
 Q_{\min} = (s, \underline{v}) &= (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= (\cos(45^\circ), 0, 0, \sin(45^\circ)) = \\
 &= (0.707, 0, 0, 0.707)
 \end{aligned}$$

0, 0, 0

- розташування СК Сх ПР вздовж осі Z в СК останньої ланки МС ПР, мм
- розташування СК Сх ПР вздовж осі Y в СК останньої ланки МС ПР, мм
- розташування СК Сх ПР вздовж осі X в СК останньої ланки МС ПР, мм

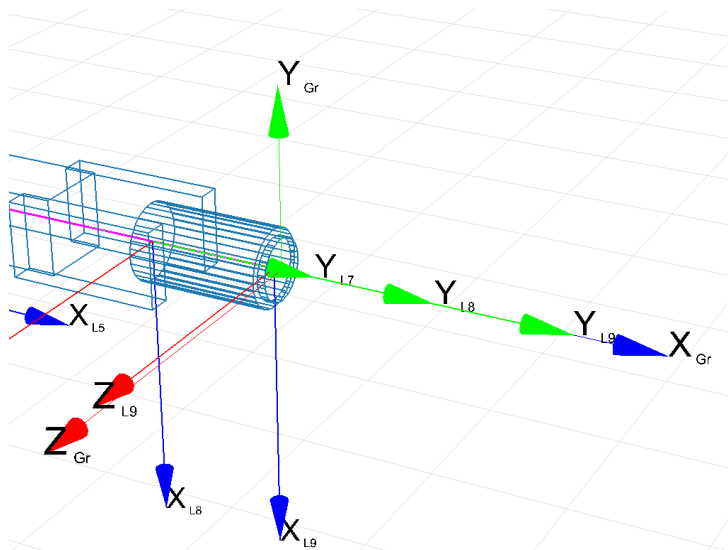


Рис. 6.4.2.2.1. Розташування СК Сх ПР в СК МС ПР

6.4.2.3. Опис елементів групи С Сх ПР

```
Gripper(LGR 32) = {
  M(2)
  CFP[(0, 0, 0)(0.707,0,0,0.707)]
  C{
    GP:[PD:0, 0, 0, 130.5, 60, 37;]
  }
}
```

Тут:

С – ідентифікатор групи нерухомих (constant) елементів Сх

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма СхПР

PD: 0, 0, 0, 130.5, 60, 37 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

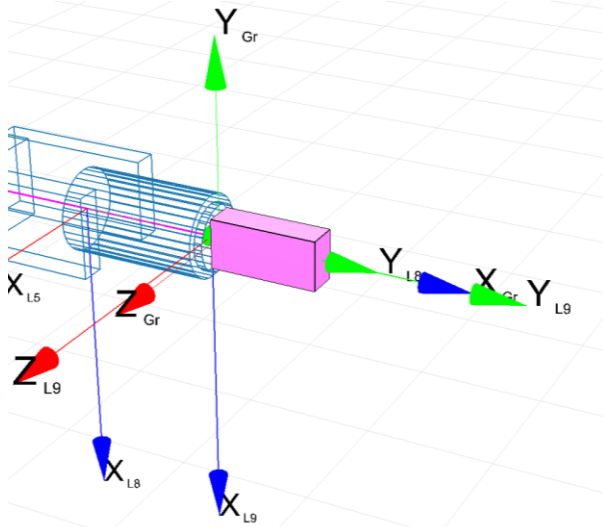
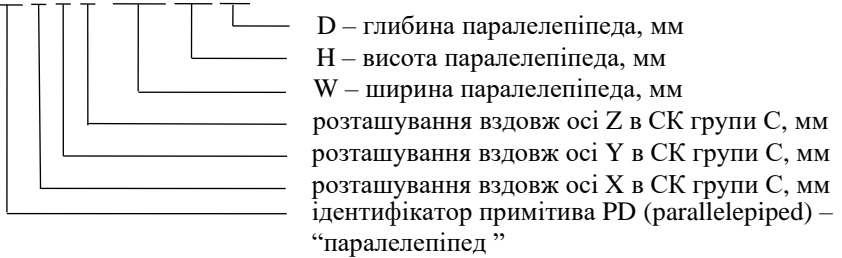


Рис. 6.4.2.3.1. Геометричні примітиви групи С в СК Сх ПР

6.4.2.4. Опис елементів групи V1 СхПР

```
Gripper(LGR 32) = {
  CFP[(0, 0, 0)(0.707,0,0,0.707)]
  M(2)
  C{
    GP:[PD:0, 0, 0, 130.5, 60, 37;]
  }
  V{
    LIM[(0, 119, 24, 0)(0, 119, 24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, 0.707)]
    GP:[
      PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
      PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
      PD:20, 12.5, 0, 58, 14, 16;
      PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,0.174;
      PD:76, 13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,-0.174;
      PD:110, -0.5, 0, 6, 11.5, 16;
    ]
  }
}
```

Тут:

V – ідентифікатор групи рухомих (variable) елементів Сх

LIM – ідентифікатор обмежень групи V1

LIM[(0, 119, 24, 0)(0, 119, 24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, 0.707)]

0.707, 0, 0, 0.707 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) СК групи V1 в СК Сх

$$Q_{\max} = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) =$$

$$= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) =$$

$$= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right.$$

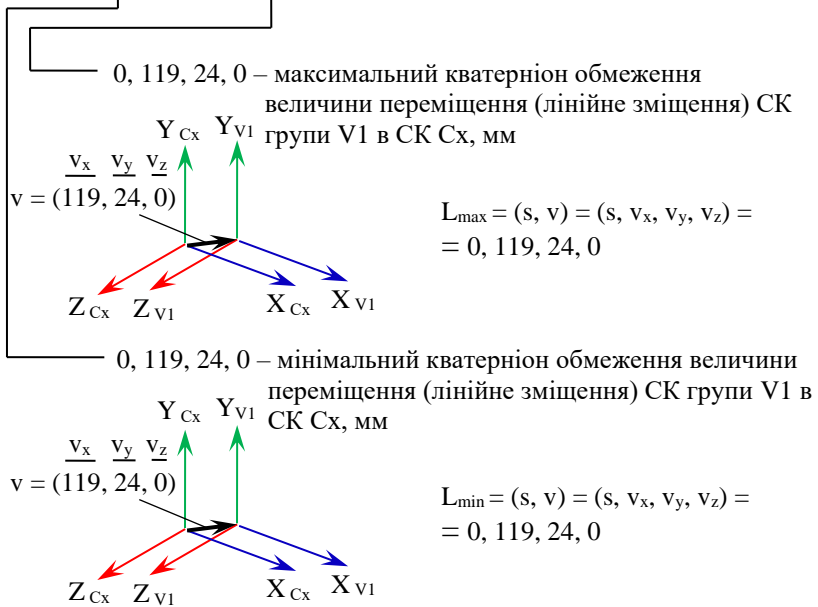
$$\left. 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \right) =$$

$$= (\cos(45^\circ), 0, 0, \sin(45^\circ)) =$$

$$= (0.707, 0, 0, 0.707)$$

1, 0, 0, 0 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) СК групи V1 в СК Сх (переміщення відсутнє)

LIM[(0, 119, 24, 0)(0, 119, 24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, 0.707)]



GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма СхПР

PD: -15, 0, 0, 30, 12.5, 16 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

- D – глибина паралелепіпеда, мм
- H – висота паралелепіпеда, мм
- W – ширина паралелепіпеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК групи V1, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи V1, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи V1, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

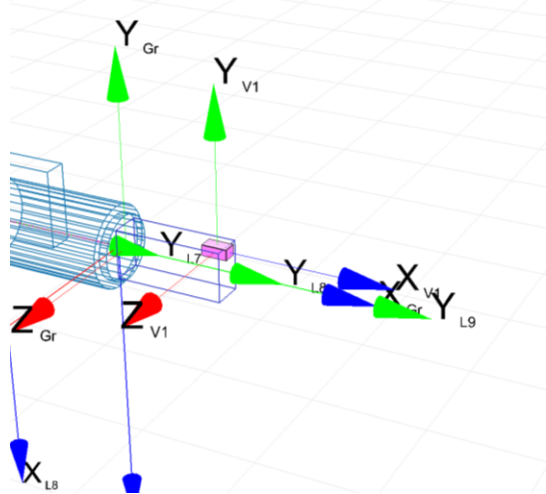
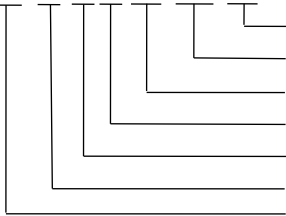


Рис. 6.4.2.4.1. Геометричні примітиви групи V1 в СК Сх ПР

PD: 15, 0, 0, 30, 12.5, 16 – геометричний примітив типу “паралелепіед”



D – глибина паралелепіеда, мм

H – висота паралелепіеда, мм

W – ширина паралелепіеда, мм

розташування вздовж осі Z в СК групи V1, мм

розташування вздовж осі Y в СК групи V1, мм

розташування вздовж осі X в СК групи V1, мм

ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіед”

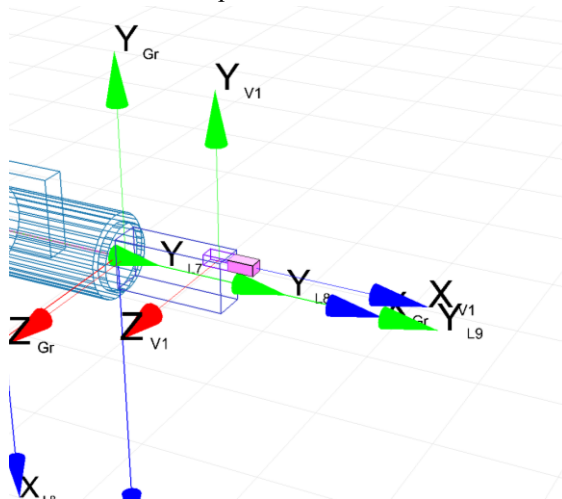


Рис. 6.4.2.4.2. Геометричні примітиви групи V1 в СК Сх ПР

PD: 20, 12.5, 0, 58, 14, 16 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V1, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V1, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V1, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

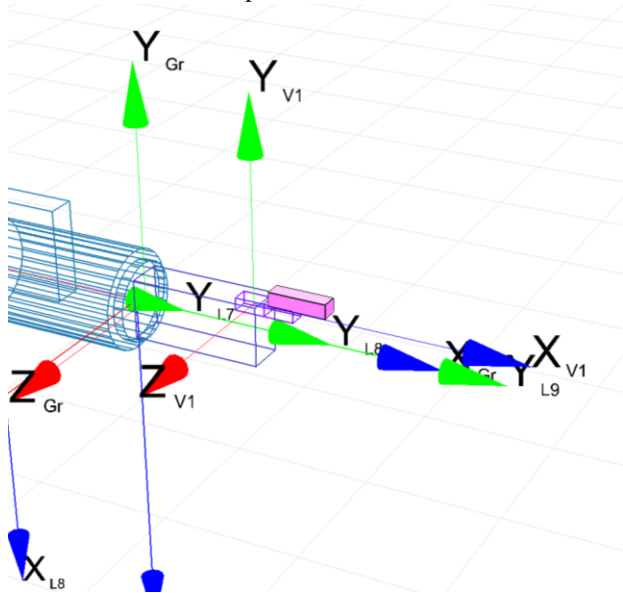


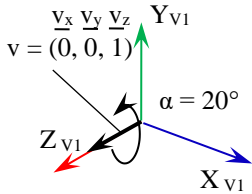
Рис. 6.4.2.4.3. Геометричні примітиви групи V1 в СК Сх ПР

PD: 42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, 0.174 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V1, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V1, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V1, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

PD: 42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, 0.174

0.985, 0, 0, 0.174 – кватерніон орієнтації паралелепіпеда



$$\begin{aligned}
 Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{20^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{20^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{20^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{20^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(10^\circ), 0, 0, \sin(10^\circ) \right) = \\
 &= (0.985, 0, 0, 0.174)
 \end{aligned}$$

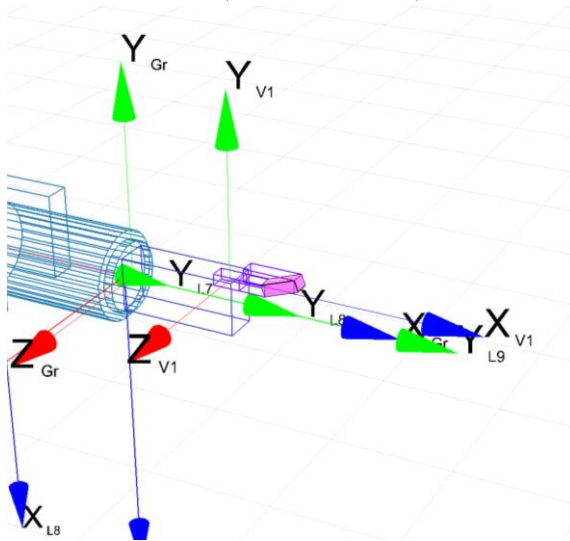
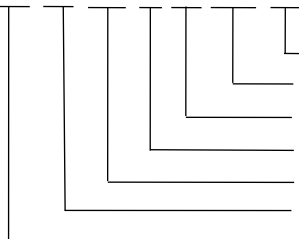


Рис. 6.4.2.4.4. Геометричні примітиви групи V1 в СК Sx PR

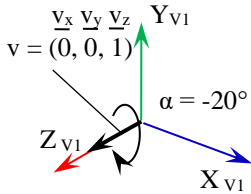
PD: 76, 13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, -0.174 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V1, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V1, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V1, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

PD: 76, 13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, -0.174

0.985, 0, 0, -0.174 – кватерніон орієнтації паралелепіпеда



$$\begin{aligned}
 Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{-20^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{-20^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-20^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-20^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(-10^\circ), 0, 0, \sin(-10^\circ) \right) = \\
 &= (0.985, 0, 0, -0.174)
 \end{aligned}$$

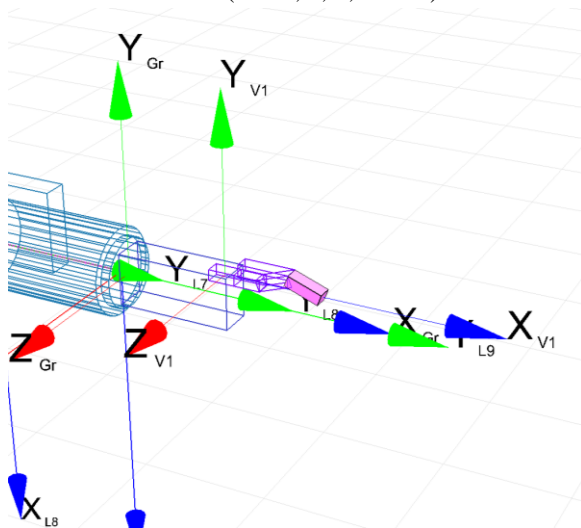
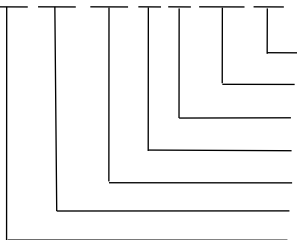


Рис. 6.4.2.4.5. Геометричні примітиви групи V1 в СК Сх ПР

PD: 110, -0.5, 0, 6, 11.5, 16 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



- D – глибина паралелепіпеда, мм
- H – висота паралелепіпеда, мм
- W – ширина паралелепіпеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК групи V1, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи V1, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи V1, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

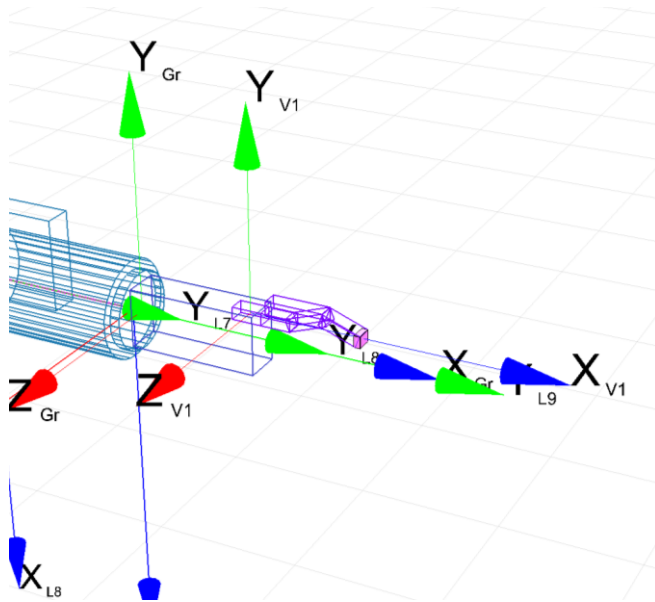


Рис. 6.4.2.4.6. Геометричні примітиви групи V1 в СК Сх ПР

6.4.2.5. Опис елементів групи V2 Сх ПР

```

Gripper(LGR 32) = {
  CFP[(0, 0, 0)(0.707,0,0,0.707)]
  M(2)
  C{
    GP:[PD:0, 0, 0, 130.5, 60, 37;]
  }
  V{
    LIM[(0, 119, 24, 0)(0, 119, 24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, 0.707)]
    GP:[
      PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
      PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
      PD:20, 12.5, 0, 58, 14, 16;
      PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,0.174;
      PD:76, 13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,-0.174;
      PD:110, -0.5, 0, 6, 11.5, 16;
    ]
  }
}

```



```

V{
  LIM[(0, 119, -24, 0)(0, 119, -24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, -0.707)]
  GP:[
    PD:-15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
    PD:15, 0, 0, 30, 12.5, 16;
    PD:20, -12.5, 0, 58, 14, 16;
    PD:42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,-0.174;
    PD:76, -13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985,0,0,0.174;
    PD:110, 0.5, 0, 6, 11.5, 16;
  ]
}

```

Тут:

V – ідентифікатор групи рухомих (variable) елементів Cx

LIM – ідентифікатор обмежень групи V2

LIM[(0, 119,-24, 0)(0, 119,-24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0,-0.707)]

0.707, 0, 0,-0.707 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) СК групи V2 в СК Cx

$$\begin{aligned}
 Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{-90^\circ}{2}, \right. \\
 &\quad \left. 0 \cdot \sin \frac{-90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-90^\circ}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos(-45^\circ), 0, 0, \sin(-45^\circ) \right) = \\
 &= (0.707, 0, 0,-0.707)
 \end{aligned}$$

1, 0, 0, 0 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) СК групи V2 в СК Cx (переміщення відсутнє)

LIM[(0, 119, -24, 0)(0, 119, -24, 0)(1, 0, 0, 0)(0.707, 0, 0, -0.707)]



GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма СхПР

PD: -15, 0, 0, 30, 12.5, 16 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

- D – глибина паралелепіпеда, мм
- H – висота паралелепіпеда, мм
- W – ширина паралелепіпеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК групи V2, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи V2, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи V2, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

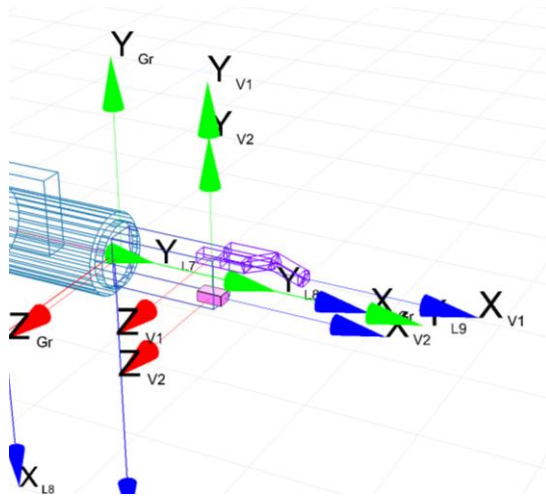
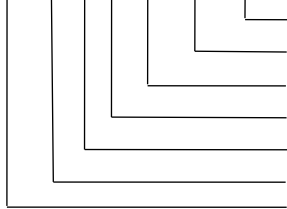


Рис. 6.4.2.5.1. Геометричні примітиви групи V2 в СК Сх ПР

PD: 15, 0, 0, 30, 12.5, 16 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм

H – висота паралелепіпеда, мм

W – ширина паралелепіпеда, мм

розташування вздовж осі Z в СК групи V2, мм

розташування вздовж осі Y в СК групи V2, мм

розташування вздовж осі X в СК групи V2, мм

ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

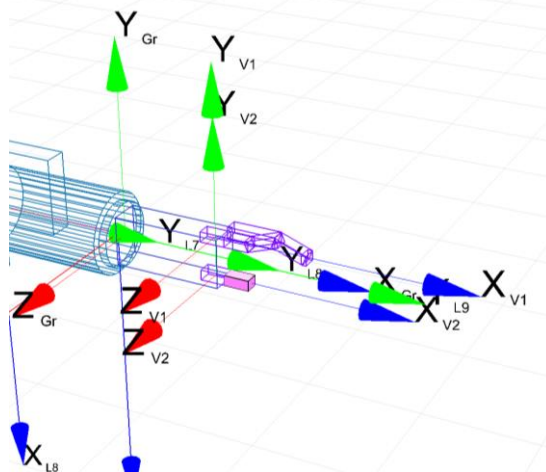


Рис. 6.4.2.5.2. Геометричні примітиви групи V2 в СК Сх ПР

PD: 20,-12.5, 0, 58, 14, 16 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V2, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

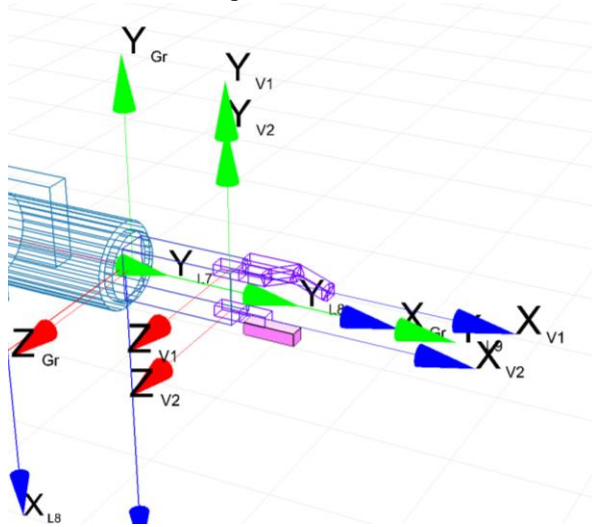
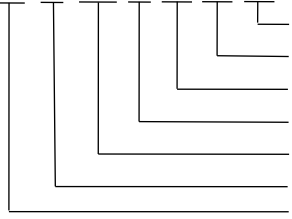
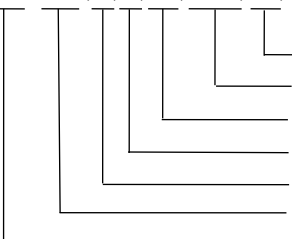


Рис. 6.4.2.5.3. Геометричні примітиви групи V2 в СК Сх ПР

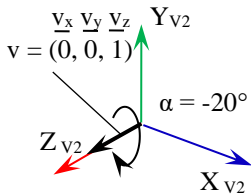
PD: 42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, -0.174 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V2, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”



PD: 42.5, 0, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, -0.174

0.985, 0, 0, -0.174 – кватерніон орієнтації паралелепіпеда



$$\begin{aligned}
 Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{-20^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{-20^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-20^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-20^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(-10^\circ), 0, 0, \sin(-10^\circ) \right) = \\
 &= (0.985, 0, 0, -0.174)
 \end{aligned}$$

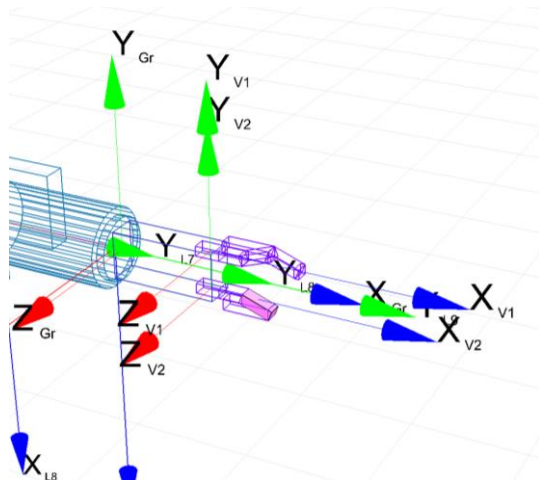
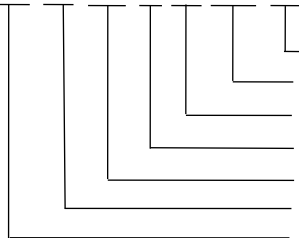


Рис. 6.4.2.5.4. Геометричні примітиви групи V2 в СК Sx ПР

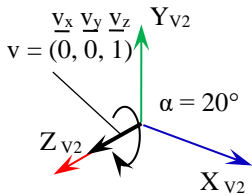
PD: 76,-13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, 0.174 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V2, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

PD: 76,-13.2, 0, 40, 12.5, 16, 0.985, 0, 0, 0.174

0.985, 0, 0, 0.174 – кватерніон орієнтації паралелепіпеда



$$\begin{aligned}
 Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{20^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{20^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{20^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{20^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= \left(\cos(10^\circ), 0, 0, \sin(10^\circ) \right) = \\
 &= (0.985, 0, 0, 0.174)
 \end{aligned}$$

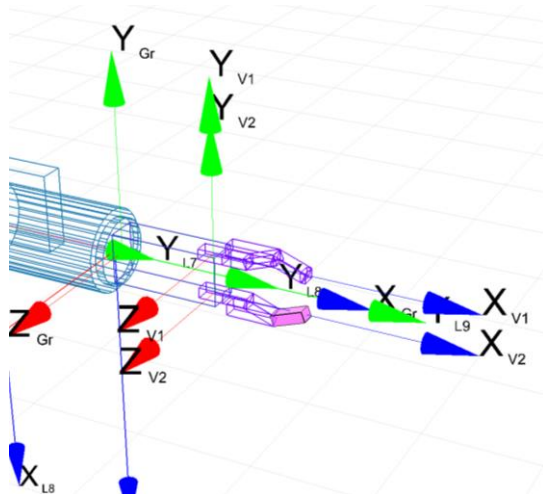
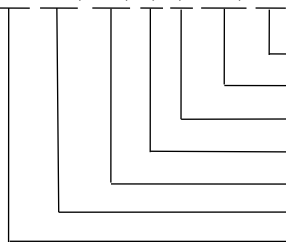


Рис. 6.4.2.5.5. Геометричні примітиви групи V2 в СК Сх ПР

PD: 110, 0.5, 0, 6, 11.5, 16 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V2, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) –
 “паралелепіпед”

6.4.3.2. Опис початку СК ДТО в СК ПР

```
WE(Table)={
  CFP[(-1400,0,1000)(1,0,0,0)]
}
```

Тут:

(Table) – назва ТО

CFP[(-1400,0,1000)(1,0,0,0)] – зміщення початку СК ДТО в СК ПР

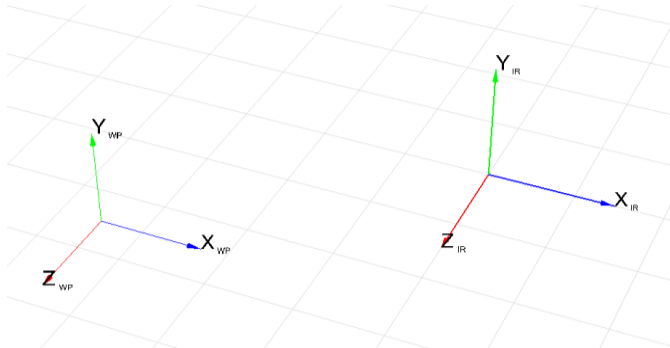
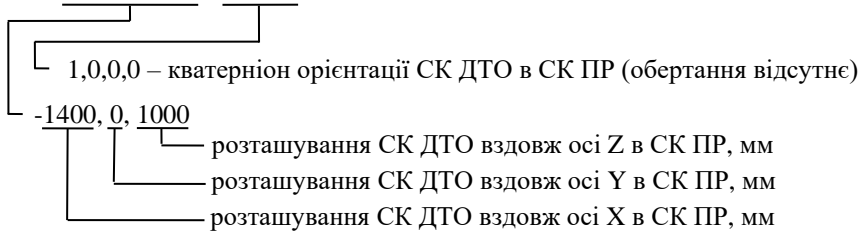


Рис. 6.4.3.2.1. Зміщення початку СК ДТО в СК ПР

6.4.3.3. Опис елементів групи С ДТО

```
WE(Table)={
  CFP[(-1400,0,1000)(1,0,0,0)]
  C{
  GP:[
    PD:200,400,220,50,800,50;
    PD:200,400,-220,50,800,50;
    PD:2000,400,220,50,800,50;
    PD:2000,400,-220,50,800,50;

    PD:0,800,0,2300,100,650;
    PD:200,850,0,1900,50,250;
  ]
}
```


}
}

Тут:

C – ідентифікатор групи нерухомих (constant) елементів ДТО

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ДТО

PD: 200, 400, 220, 50, 800, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

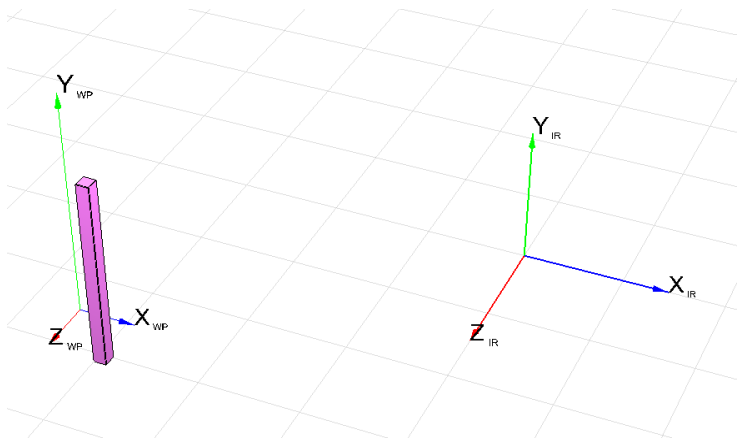
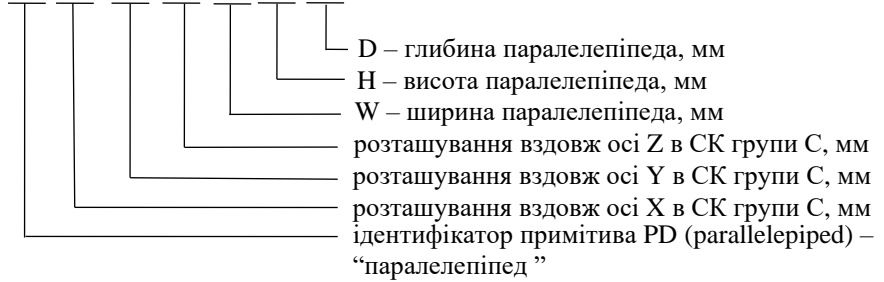
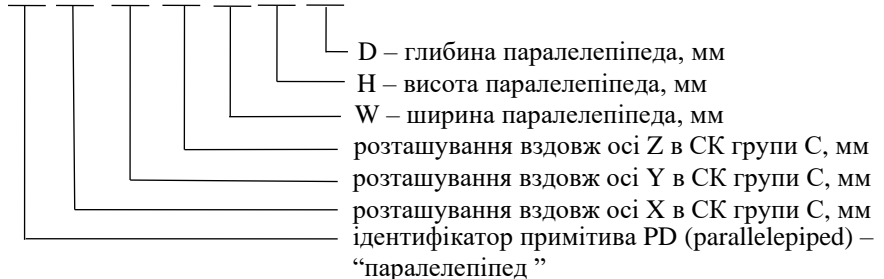


Рис. 6.4.3.3.1. Геометричні примітиви групи C в СК ДТО

PD: 200, 400,-220, 50, 800, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



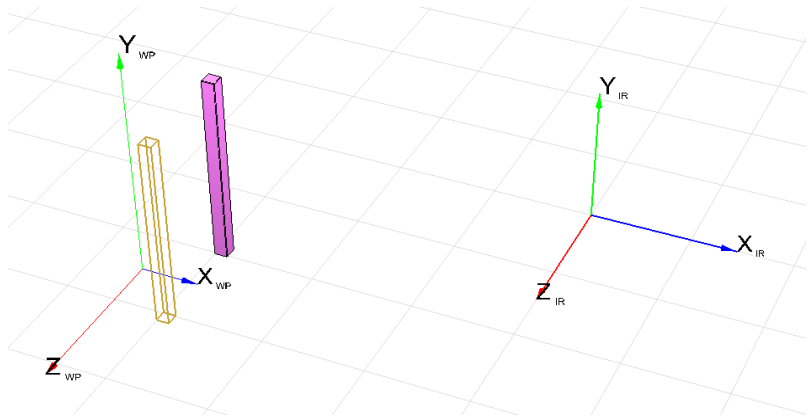
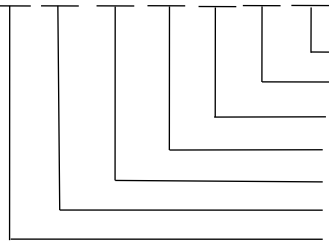


Рис. 6.4.3.3.2. Геометричні примітиви групи С в СК ДТО

PD:2000, 400, 220, 50, 800, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм

H – висота паралелепіпеда, мм

W – ширина паралелепіпеда, мм

розташування вздовж осі Z в СК групи С, мм

розташування вздовж осі Y в СК групи С, мм

розташування вздовж осі X в СК групи С, мм

ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

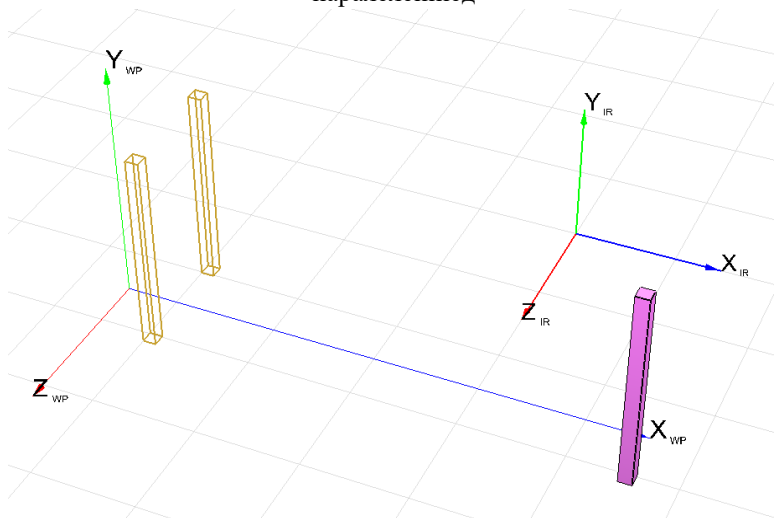
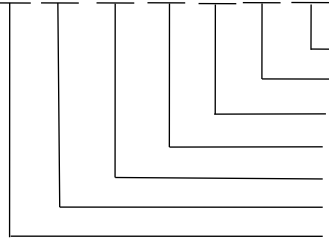


Рис. 6.4.3.3.3. Геометричні примітиви групи С в СК ДТО

PD:2000, 400,-220, 50, 800, 50– геометричний примітив типу “паралелепіпед”



- D – глибина паралелепіпеда, мм
- H – висота паралелепіпеда, мм
- W – ширина паралелепіпеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК групи C, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи C, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи C, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

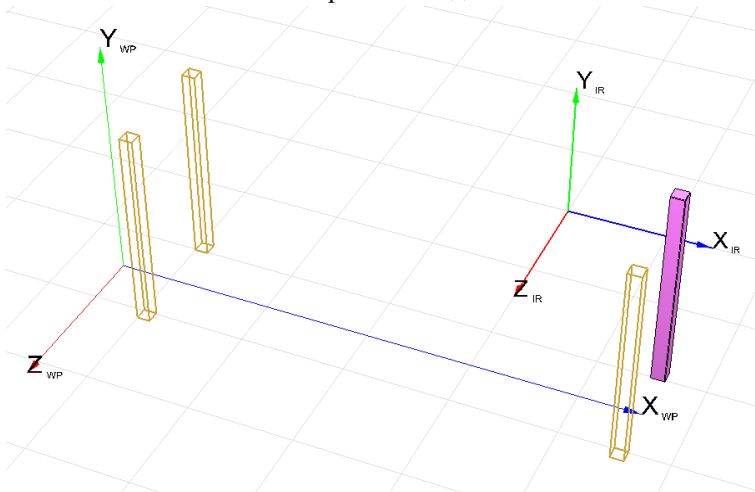
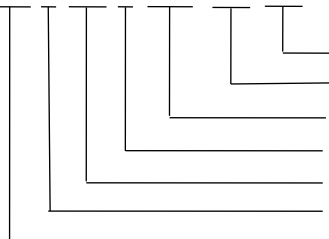


Рис. 6.4.3.3.4. Геометричні примітиви групи C в СК ДТО

PD: 0, 800, 0, 2300, 100, 650 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



- D – глибина паралелепіпеда, мм
- H – висота паралелепіпеда, мм
- W – ширина паралелепіпеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК групи C, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи C, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи C, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

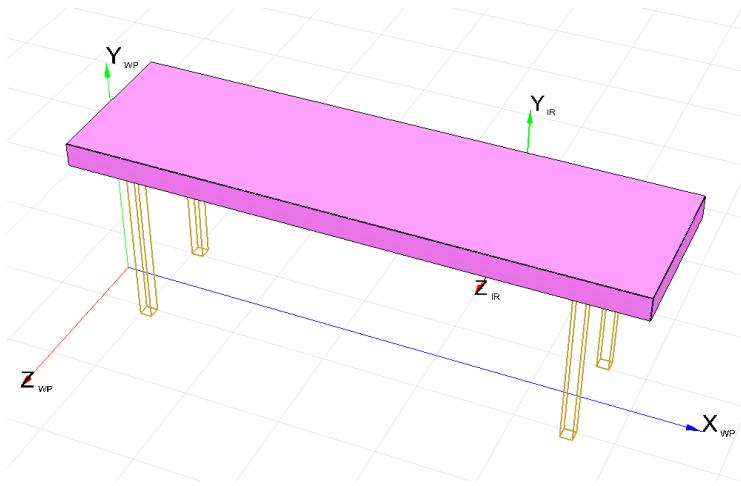
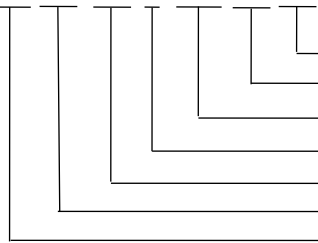


Рис. 6.4.3.3.5. Геометричні примітиви групи С в СК ДТО

PD: 200, 850, 0, 1900, 50, 250 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм

H – висота паралелепіпеда, мм

W – ширина паралелепіпеда, мм

розташування вздовж осі Z в СК групи С, мм

розташування вздовж осі Y в СК групи С, мм

розташування вздовж осі X в СК групи С, мм

ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

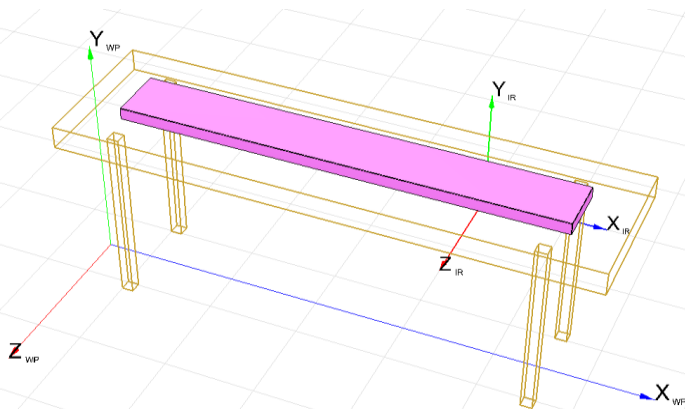


Рис. 6.4.3.3.6. Геометричні примітиви групи С в СК ДТО

6.4.4. Формування ІМ ПрРП₁

6.4.4.1. Загальна інформація

Нижче проілюстровано складання ІМ Пр на прикладі формалізованого опису Пр типу “призма” (див. рис. 6.4.4.1.1) для подальшої роботи із програмним продуктом “Robix”.

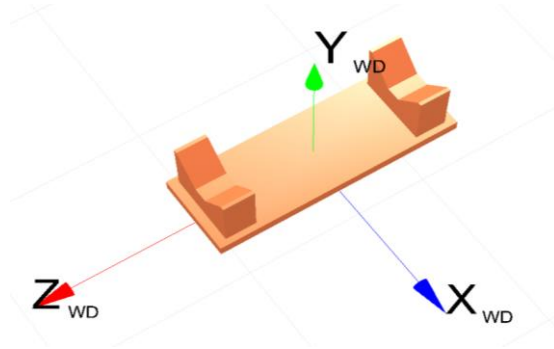


Рис. 6.4.4.1.1. 3D-еквівалент (твердотільна модель) Пр “призма”

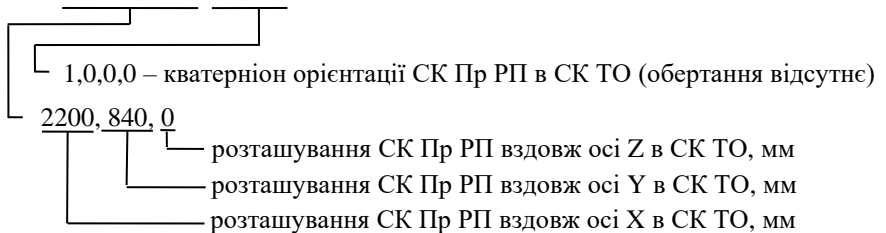
6.4.4.2. Опис початку СК Пр РП в СК ТО

```
Dv(Prism)={  
  CFP[(2200, 840, 0)(1, 0, 0, 0)]  
}
```

Тут:

(Prism) – назва ПрРП

CFP[(2200, 840, 0)(1,0,0,0)] – зміщення початку СК Пр РП в СК ТО



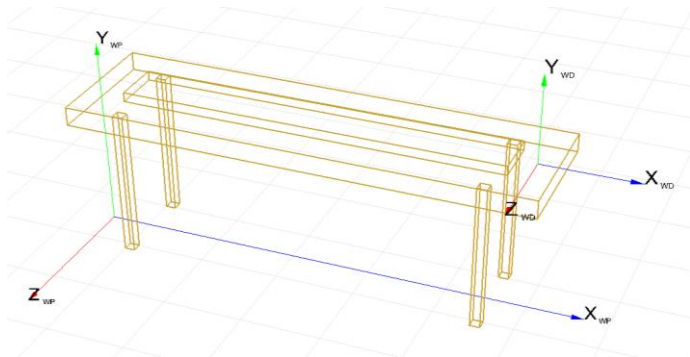


Рис. 6.4.4.2.1. Зміщення початку СК Пр РП в СК ТО

6.4.4.3. Опис елементів групи С Пр РП

```

Dv(Prism)={
  CFP[(2200, 840, 0)(1, 0, 0, 0)]
  C{
    GP:[
      PD:-70, 20, 0, 140, 20, 400;
      PD:-60, 55, 160, 120, 55, 50;
      PD:-60, 55, -160, 120, 55, 50;
      TZ:-35, 80, 160, 50, 55, 50, 6, 0, 23, 0.707,0,0,0.707;
      TZ:35, 80, 160, 50, 55, 50, 6, 0, -23, 0.707,0,0,0.707;
      TZ:-35, 80, -160, 50, 55, 50, 6, 0, 23, 0.707,0,0,0.707;
      TZ:35, 80, -160, 50, 55, 50, 6, 0, -23, 0.707,0,0,0.707;
    ]
  }
}

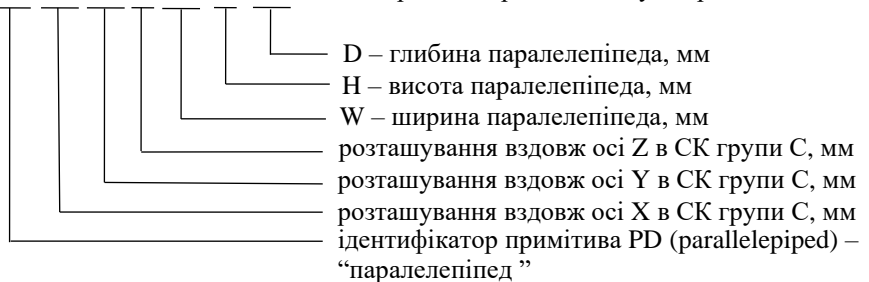
```

Тут:

С – ідентифікатор групи нерухомих (constant) елементів Пр РП

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма Пр РП

PD: -70, 20, 0, 140, 20, 400 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



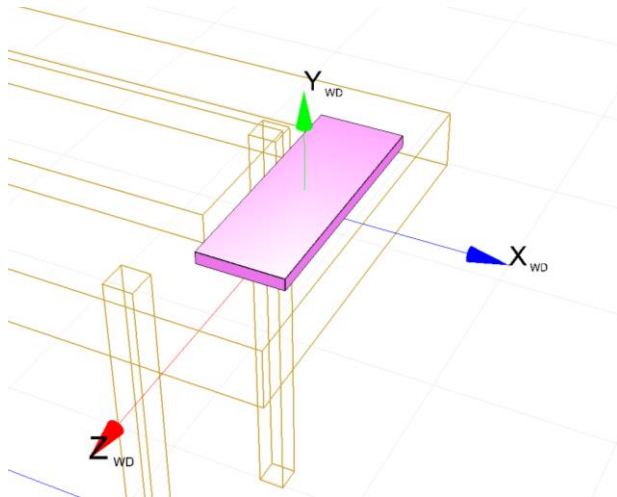


Рис. 6.4.4.3.1. Геометричні примітиви групи С в СК Пр РП

PD: -60, 55, 160, 120, 55, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

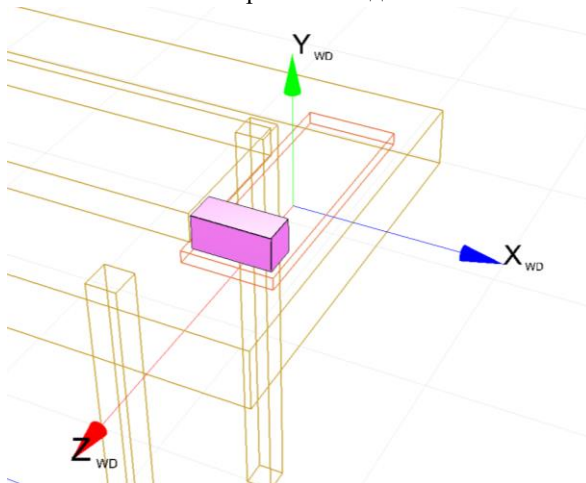
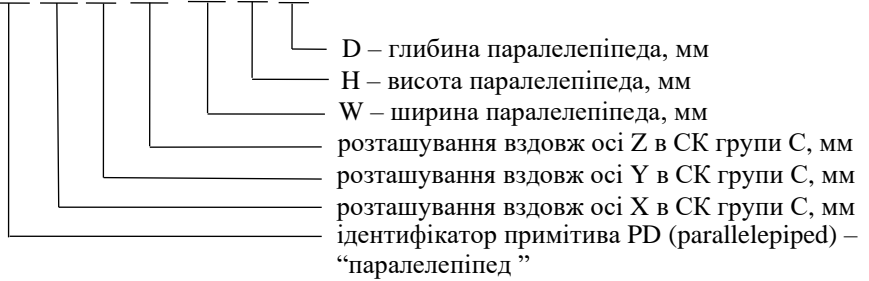
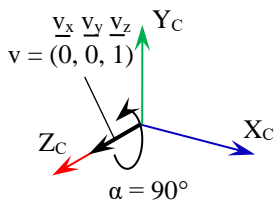


Рис. 6.4.4.3.2. Геометричні примітиви групи С в СК Пр РП

TZ: -35, 80, 160, 50, 55, 50, 6, 0, 23, 0.707, 0, 0, 0.707

0.707, 0, 0, 0.707 – кватерніон орієнтації трапеції в СК групи С



$$\begin{aligned}
 Q_{Tz} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right. \\
 &\quad \left. 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos(45^\circ), 0, 0, \sin(45^\circ) \right) = \\
 &= (0.707, 0, 0, 0.707)
 \end{aligned}$$

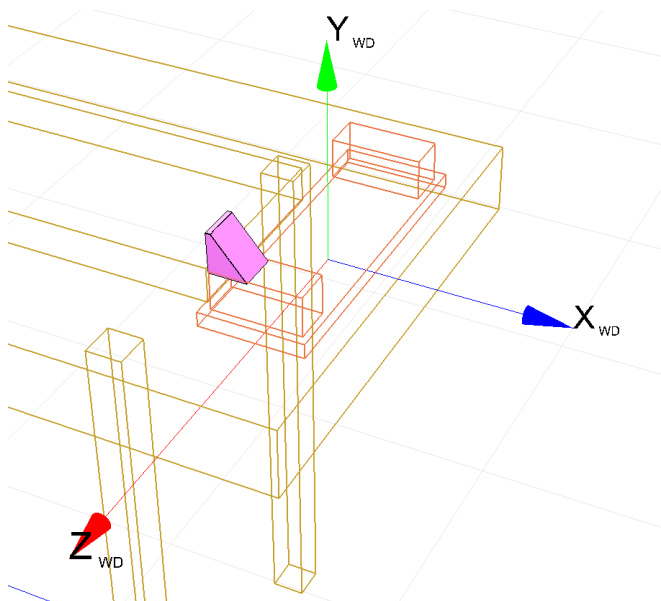


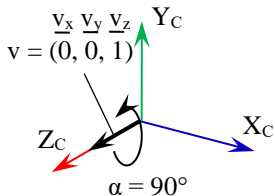
Рис. 6.4.4.3.4. Геометричні примітиви групи С в СК Пр РП

TZ: – геометричний примітив типу “трапеція”

ідентифікатор примітива TZ (Trapeze) – “ трапеція”

TZ: 35, 80, 160, 50, 55, 50, 6, 0, -23, 0.707, 0, 0, 0.707

0.707, 0, 0, 0.707 – кватерніон орієнтації трапеції в СК групи C



$$\begin{aligned}
 Q_{TZ} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= (\cos(45^\circ), 0, 0, \sin(45^\circ)) = \\
 &= (0.707, 0, 0, 0.707)
 \end{aligned}$$

50, 55, 50, 6, 0, -23

- b – зміщення висоти H2, мм
- a – зміщення висоти H1, мм
- H2 – права висота трапеції, мм
- H1 – ліва висота трапеції, мм
- W – довжина трапеції вздовж вектора напрямку, мм
- D – глибина трапеції, мм

35, 80, 160

- розташування вздовж осі Z в СК групи C, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи C, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи C, мм

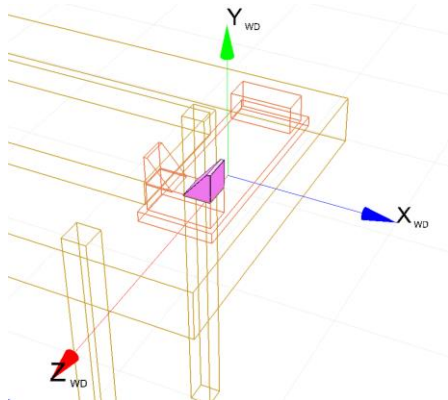


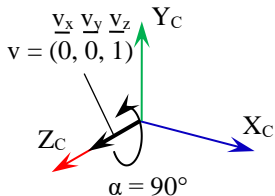
Рис. 6.4.4.3.5. Геометричні примітиви групи C в СК Пр РП

TZ: – геометричний примітив типу “трапеція”

ідентифікатор примітива TZ (Trapeze) – “ трапеція”

TZ:-35, 80,-160, 50, 55, 50, 6, 0, 23, 0.707, 0, 0, 0.707

0.707, 0, 0, 0.707 – кватерніон орієнтації трапеції в СК групи С



$$\begin{aligned}
 Q_{TZ} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= (\cos(45^\circ), 0, 0, \sin(45^\circ)) = \\
 &= (0.707, 0, 0, 0.707)
 \end{aligned}$$

50, 55, 50, 6, 0, 23

b – зміщення висоти H2, мм
 a – зміщення висоти H1, мм
 H2 – права висота трапеції, мм
 H1 – ліва висота трапеції, мм
 W – довжина трапеції вздовж
 вектора напрямку, мм
 D – глибина трапеції, мм

-35, 80,-160

розташування вздовж осі Z в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи С, мм

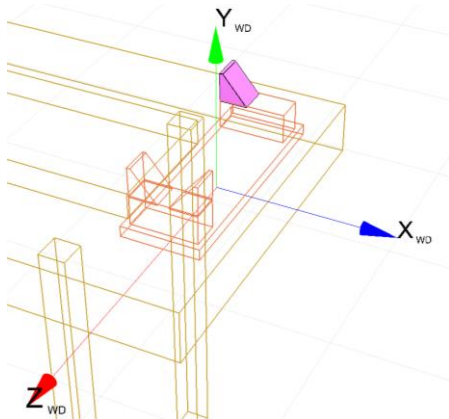


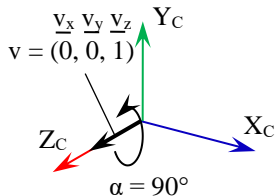
Рис. 6.4.4.3.6. Геометричні примітиви групи С в СК Пр РП

TZ: – геометричний примітив типу “трапеція”

ідентифікатор примітива TZ (Trapeze) – “ трапеція”

TZ: 35, 80,-160, 50, 55, 50, 6, 0, -23, 0.707, 0, 0, 0.707

0.707, 0, 0, 0.707 – кватерніон орієнтації трапеції в СК групи С



$$\begin{aligned}
 Q_{TZ} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right. \\
 &0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \left. \right) = \\
 &= (\cos(45^\circ), 0, 0, \sin(45^\circ)) = \\
 &= (0.707, 0, 0, 0.707)
 \end{aligned}$$

50, 55, 50, 6, 0, -23

b – зміщення висоти H2, мм
 a – зміщення висоти H1, мм
 H2 – права висота трапеції, мм
 H1 – ліва висота трапеції, мм
 W – довжина трапеції вздовж
 вектора напрямку, мм
 D – глибина трапеції, мм

35, 80,-160

розташування вздовж осі Z в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи С, мм

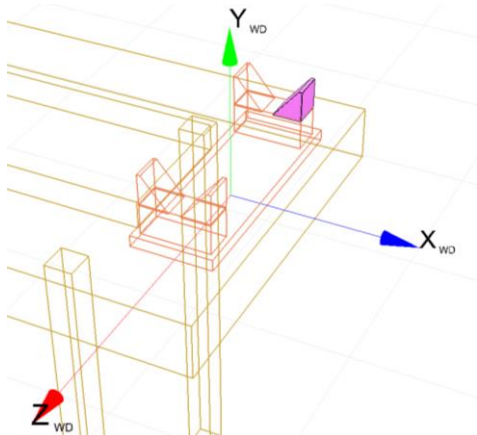


Рис. 6.4.4.3.7. Геометричні примітиви групи С в СК Пр РП

6.4.5. Формування ІМ ОМ РПі

6.4.5.1. Загальна інформація

Нижче проілюстровано складання ІМ ОМ на абстрактному прикладі формалізованого опису ОМ типу “тіло обертання” (див. рис. 6.4.5.1.1) для подальшої роботи із програмним продуктом “Robix”.

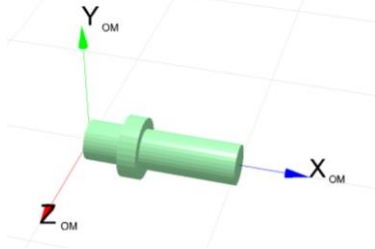


Рис. 6.4.5.1.1. 3D-еквівалент (твердотільна модель) ОМ типу “тіло обертання”

6.4.5.2. Опис початку СК ОМ в СК Пр РП

```
OM(Solid of revolution)={
  CFP[(0, 150, 200)(0.707, 0, 0.707, 0)]
  M(1)
}
```

Тут:

(Solid of revolution) – назва ОМ

M(1) ідентифікатор та значення маси ОМ, кг

CFP[(0, 150, 200)(0.707, 0, 0.707, 0)] – зміщення початку СК ОМ в СК ПрРП

0.707, 0, 0.707, 0 – кватерніон орієнтації СК ОМ в СК ПрРП

$$Q = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) =$$

$$= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) =$$

$$= \left(\cos \frac{90^\circ}{2}, \right.$$

$$\left. 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{90^\circ}{2} \right) =$$

$$= (\cos(45^\circ), 0, \sin(45^\circ), 0) =$$

$$= (0.707, 0, 0.707, 0)$$

$v = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

0, 150, 200

- розташування СК ОМ вздовж осі Z в СК ПрРП, мм
- розташування СК ОМ вздовж осі Y в СК ПрРП, мм
- розташування СК ОМ вздовж осі X в СК ПрРП, мм

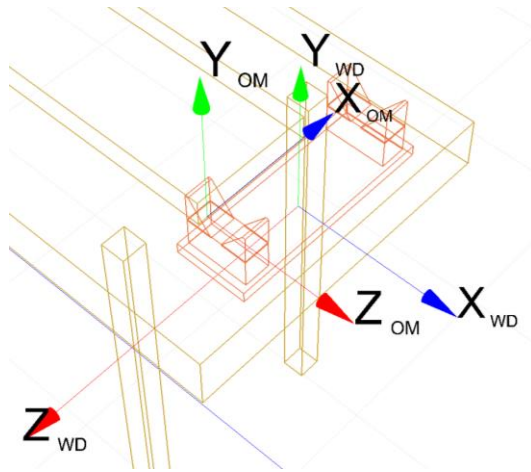


Рис. 6.4.5.2.1. Зміщення початку СК OM в СК Пр PП

6.4.5.3. Опис елементів групи C OM

```

OM(Solid of revolution)={
  CFP[(0, 150, 200)(0.7, 0, 0.7, 0)]
  M(1)
  C{
    GP:[
      CR: 0, 0, 0, 52, 100;
      CR: 100, 0, 0, 80, 50;
      CR: 150, 0, 0, 52, 250;
    ]
  }
}

```

Тут:

C – ідентифікатор групи нерухомих (constant) елементів OM

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма OM

CR: 0, 0, 0, 52, 100 – геометричний примітив типу “циліндр”

- L – довжина циліндра, мм
- R – радіус циліндра, мм
- розташування вздовж осі Z в СК OM, мм
- розташування вздовж осі Y в СК OM, мм
- розташування вздовж осі X в СК OM, мм
- ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

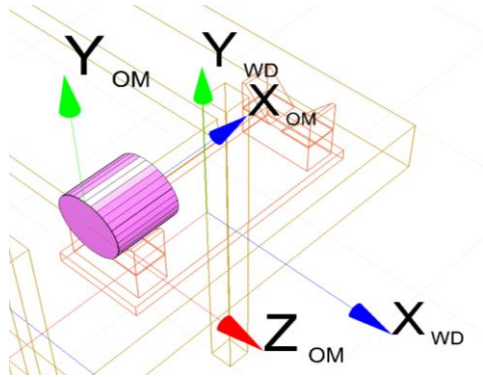


Рис. 6.4.5.3.1. Геометричні примітиви групи С в СК ОМ

CR: 100, 0, 0, 80, 50 – геометричний примітив типу “циліндр”

- L – довжина циліндра, мм
- R – радіус циліндра, мм
- розташування вздовж осі Z в СК ОМ, мм
- розташування вздовж осі Y в СК ОМ, мм
- розташування вздовж осі X в СК ОМ, мм
- ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

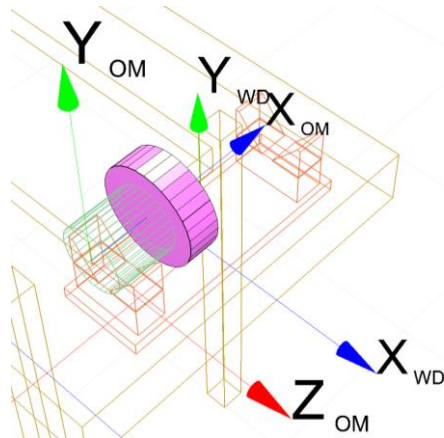


Рис. 6.4.5.3.2. Геометричні примітиви групи С в СК ОМ

CR: 150, 0, 0, 52, 250 – геометричний примітив типу “циліндр”

- L – довжина циліндра, мм
- R – радіус циліндра, мм
- розташування вздовж осі Z в СК ОМ, мм
- розташування вздовж осі Y в СК ОМ, мм
- розташування вздовж осі X в СК ОМ, мм
- ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

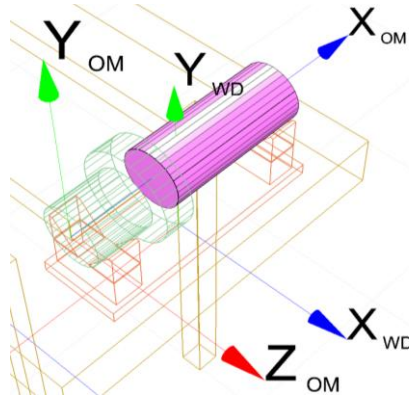


Рис. 6.4.5.3.3. Геометричні примітиви групи С в СК ОМ

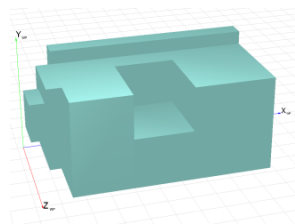
6.4.6. Формування ІМ ОТО РП₂

6.4.6.1. Загальна інформація

Нижче проілюстровано складання ІМ ОТО на прикладі формалізованого опису токарно-револьверного верстата з ЧПУ мод. 1В340Ф30 (див. рис. 6.4.6.1.1) для подальшої роботи із програмним продуктом “Robix”.



а)



б)

Рис. 6.4.6.1.1. Ілюстрація ОТО токарно-револьверного верстата з ЧПУ мод. 1В340Ф30:

- а) конструктивний оригінал
- б) 3D-еквівалент (твердотільна модель)

6.4.6.2. Опис початку СК ОТО в СК ПР

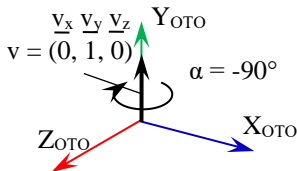
```
WE(1V340F30)={
  CFP[(3500, 0, -1500)(0.707, 0, -0.707, 0)]
}
```

Тут:

(1V340F30) – назва ТО

CFP[(3500, 0, -1500)(0.707, 0, -0.707, 0)] – зміщення початку СК ОТО в СК

0.707, 0, -0.707, 0 – кватерніон орієнтації СК ОТО в СК ПР



$$\begin{aligned}
 Q &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{-90^\circ}{2}, \right. \\
 & \quad \left. 0 \cdot \sin \frac{-90^\circ}{2}, 1 \cdot \sin \frac{-90^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-90^\circ}{2} \right) = \\
 &= (\cos(-45^\circ), 0, \sin(-45^\circ), 0) = \\
 &= (0.707, 0, -0.707, 0)
 \end{aligned}$$

3500, 0, -1500

розташування СК ОТО вздовж осі Z в СК ПР, мм

розташування СК ОТО вздовж осі Y в СК ПР, мм

розташування СК ОТО вздовж осі X в СК ПР, мм

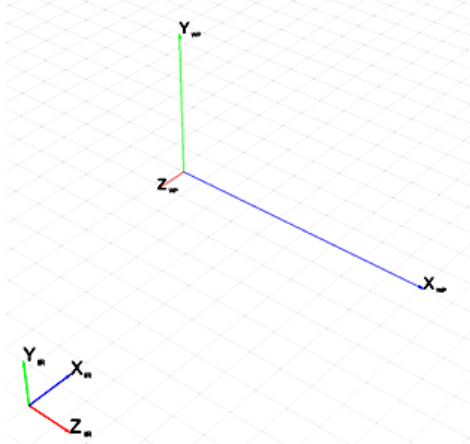


Рис. 6.4.6.2.1. Зміщення початку СК ОТО в СК ПР

6.4.6.3. Опис елементів групи С ОТО

```
WE (1V340F30) = {
  CFP[(3500, 0, -1500)(0.707, 0, -0.707, 0)]
  C{
    GP:[
      PD: 500, 855, 150, 3350, 1710, 300;
      PD: 500, 750, 1090, 1000, 1500, 1580;
      PD: 1500, 400, 1090, 1000, 800, 1580;
      PD: 1500, 1150, 500, 1000, 700, 400;
      PD: 2500, 750, 1090, 1350, 1500, 1580;
      PD: 250, 850, 800, 250, 1300, 1000;
      PD: 0, 900, 800, 250, 600, 600;
    ]
  }
}
```

Тут:

C – ідентифікатор групи нерухомих (constant) елементів ОМ

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма ОТО

PD: 500, 855, 150, 3350, 1710, 300 – геометричний примітив типу

“паралелепіпед”
 D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи C, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи C, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи C, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) –
 “паралелепіпед”

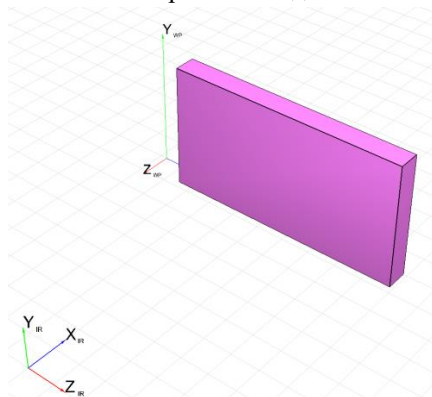


Рис. 6.4.6.3.1. Геометричні примітиви групи С в СК ОТО

PD: 500, 750, 1090, 1000, 1500, 1580 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”
 D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи C, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи C, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи C, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

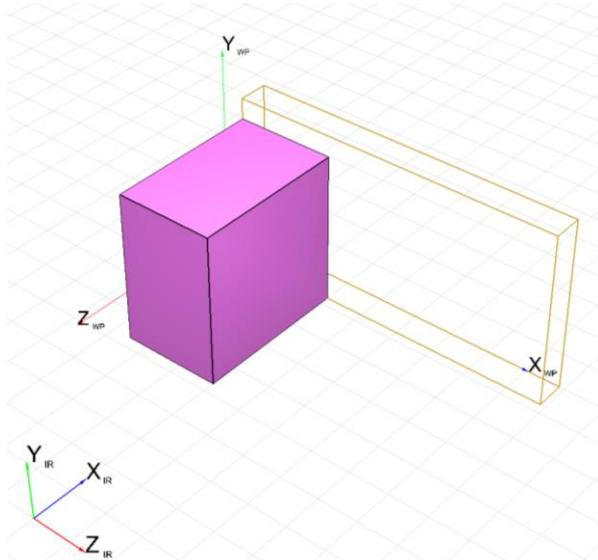


Рис. 6.4.6.3.2. Геометричні примітиви групи C в СК ОТО

PD: 1500, 400, 1090, 1000, 800, 1580 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”
 D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи C, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи C, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи C, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

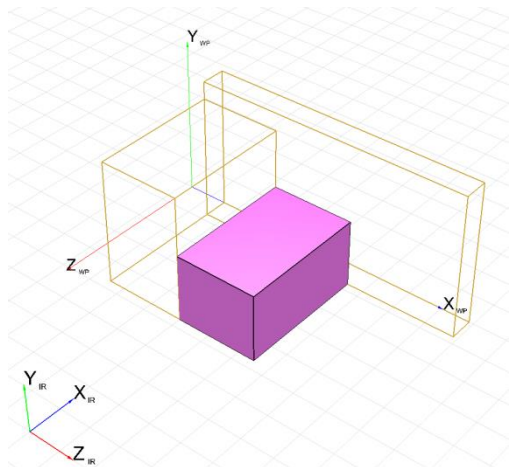


Рис. 6.4.6.3.3. Геометричні примітиви групи С в СК ОТО

PD:1500, 1150, 500, 1000, 700, 400 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”
 D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи С, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

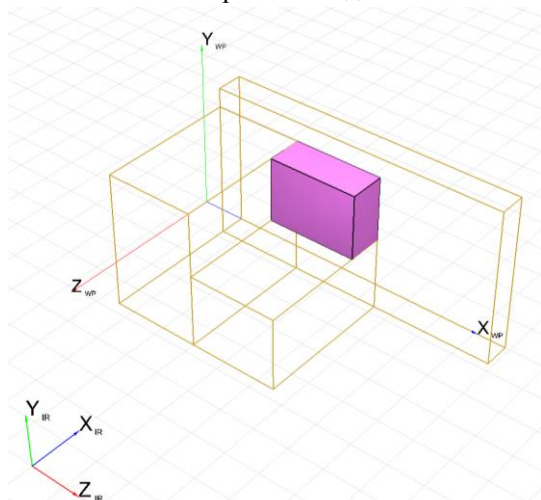


Рис. 6.4.6.3.4. Геометричні примітиви групи С в СК ОТО

PD:2500,750,1090,1350,1500,1580 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”
 D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи С, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

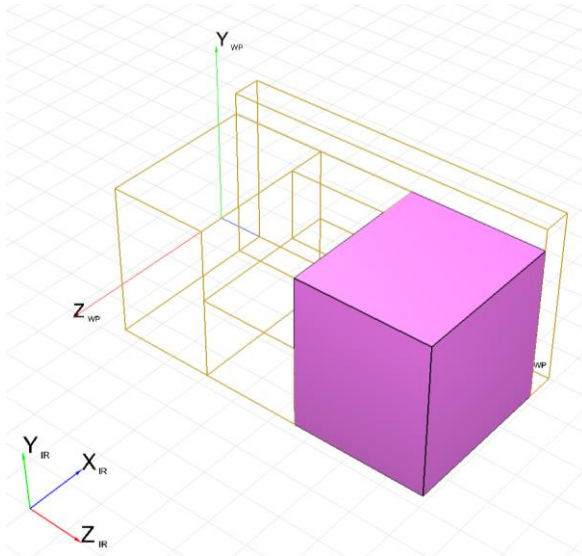


Рис. 6.4.6.3.5. Геометричні примітиви групи С в СК ОТО

PD: 250, 850, 800, 250, 1300, 1000 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”
 D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи С, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи С, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

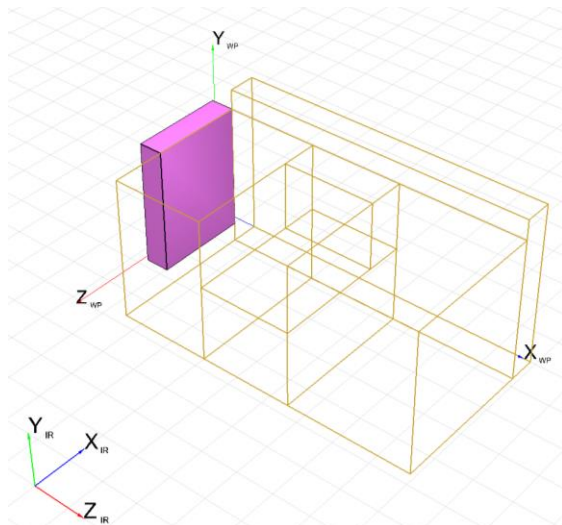


Рис. 6.4.6.3.6. Геометричні примітиви групи С в СК ОТО

PD: 0, 900, 800, 250, 600, 600 – геометричний примітив типу “паралелепіед”

- D – глибина паралелепіеда, мм
- H – висота паралелепіеда, мм
- W – ширина паралелепіеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК групи С, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи С, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи С, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіед”

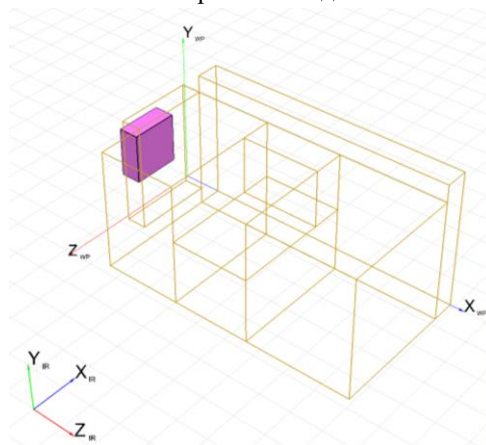


Рис. 6.4.6.3.7. Геометричні примітиви групи С в СК ОТО

6.4.7. Формування ІМ Пр РП₂

6.4.7.1. Загальна інформація

Нижче проілюстровано складання ІМ Пр на прикладі формалізованого опису Пр “трикулачковий патрон” (див рис. 6.4.7.1.1) для подальшої роботи із програмним продуктом “Robix”.

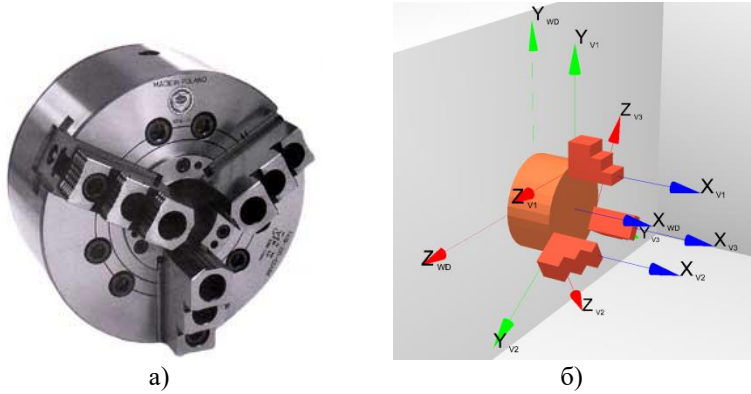


Рис. 6.4.7.1.1. Токарний самоцентрувальний трикулачковий патрон із затискним ключем:

- а) конструктивний оригінал;
- б) 3D-еквівалент (твердотільна модель)

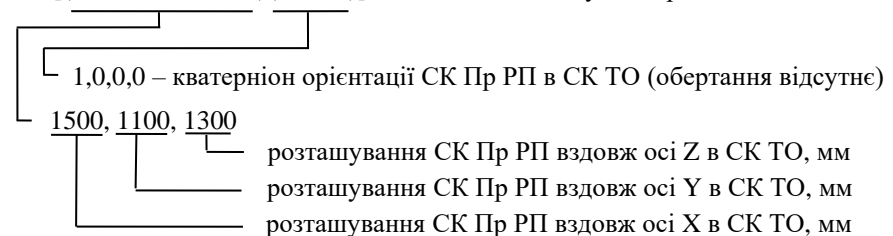
6.4.7.2. Опис початку СК Пр РП в СК ТО

```
Dv(Chuck)={  
  CFP[(1500, 1100, 1300), (1, 0, 0, 0)]  
}
```

Тут:

(Chuck) – назва Пр РП

CFP[(1500, 1100, 1300)(1,0,0,0)] – зміщення початку СК Пр РП в СК ТО



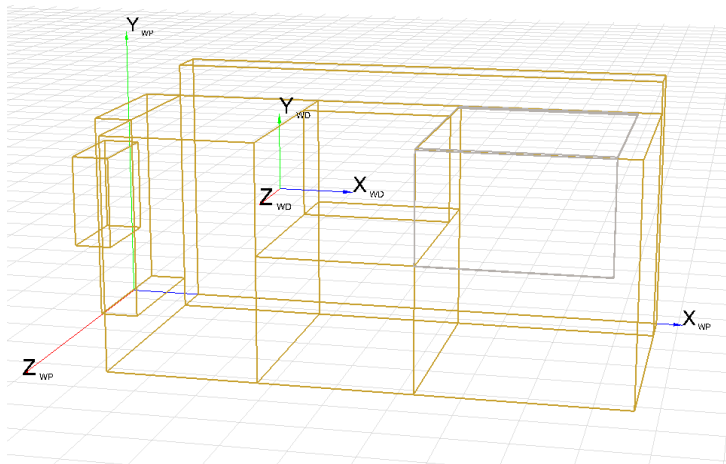


Рис. 6.4.7.2.1.Зміщення початку СК Пр РП в СК ТО

6.4.7.3. Опис елементів групи С Пр РП

```
Dv(Chuck)={
  CFP[(1500, 1100, 1300), (1, 0, 0, 0)]
  C{
    GP:[
      CR: 0, 0, 0, 100, 100;
    ]
  }
}
```

Тут:

C – ідентифікатор групи нерухомих (constant) елементів Пр РП

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма Пр РП

CR: 0, 0, 0, 100, 100 – геометричний примітив типу “циліндр”

- L – довжина циліндра, мм
- R – радіус циліндра, мм
- розташування вздовж осі Z в СК групи C, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи C, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи C, мм
- ідентифікатор примітива CR (Cylinder) – “циліндр”

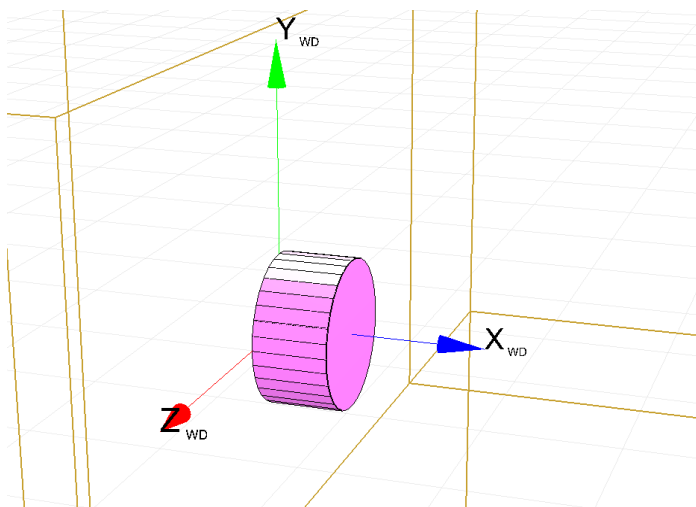


Рис. 6.4.7.3.1. Геометричні примітиви групи С в СК Пр РП

6.4.7.4. Опис елементів групи V1 Пр РП

```

Dv(Chuck)={
  CFP[(1500, 1100, 1300), (1, 0, 0, 0)]
  C{
    GP:[
      CR: 0, 0, 0, 100, 100;
    ]
  }
  V{
    LIM[(0, 100, 90, 0)(0, 100, 55, 0)(1, 0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)]
    GP: [
      PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50;
      PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50;
      PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50;
    ]
  }
}

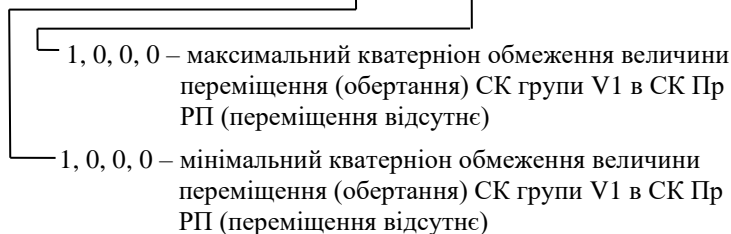
```

Тут:

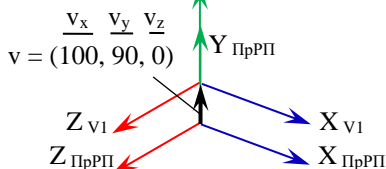
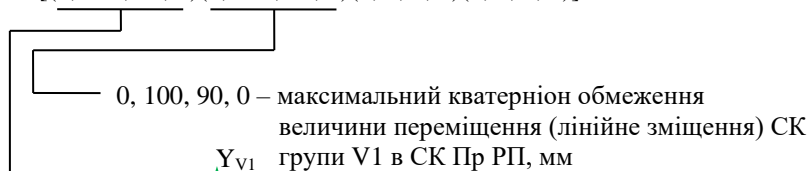
V – ідентифікатор групи рухомих (variable) елементів Пр РП

LIM – ідентифікатор обмежень групи V1

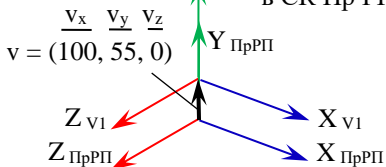
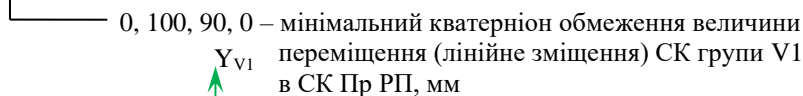
LIM[(0, 100, 90, 0)(0, 100, 55, 0)(1, 0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)]



LIM[(0, 100, 90, 0)(0, 100, 55, 0)(1, 0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)]



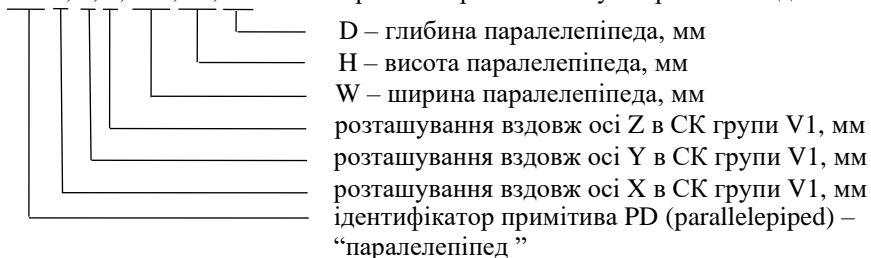
$$L_{\max} = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = 0, 100, 90, 0$$



$$L_{\min} = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = 0, 100, 55, 0$$

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма Сх РР

PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



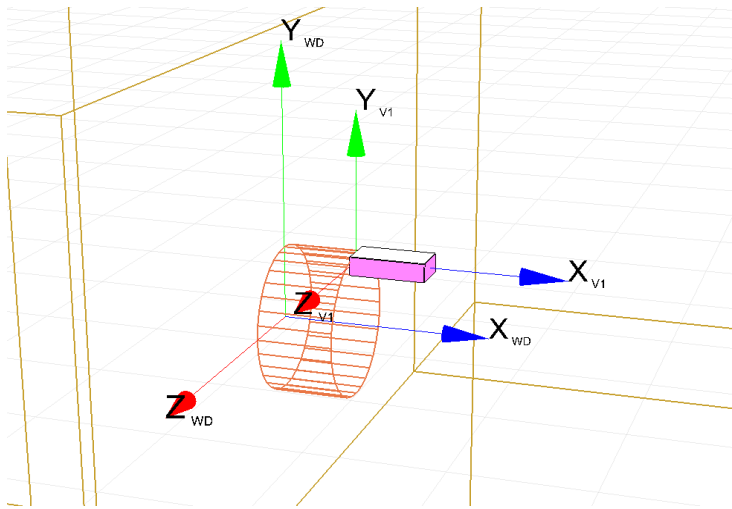
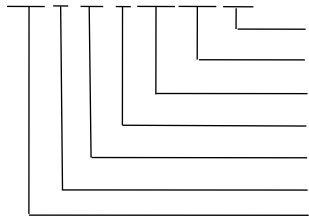


Рис. 6.4.7.4.1. Геометричні примітиви групи V1 в СК Пр РП

PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм

H – висота паралелепіпеда, мм

W – ширина паралелепіпеда, мм

розташування вздовж осі Z в СК групи V1, мм

розташування вздовж осі Y в СК групи V1, мм

розташування вздовж осі X в СК групи V1, мм

ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

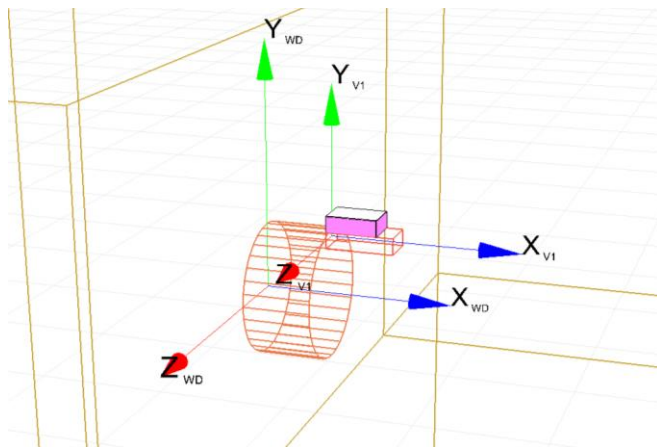
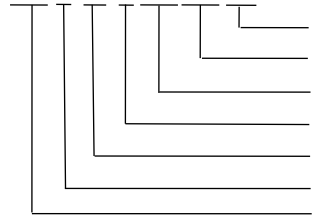


Рис. 6.4.7.4.2. Геометричні примітиви групи V1 в СК Пр РП

PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V1, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V1, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V1, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) –
 “паралелепіпед”

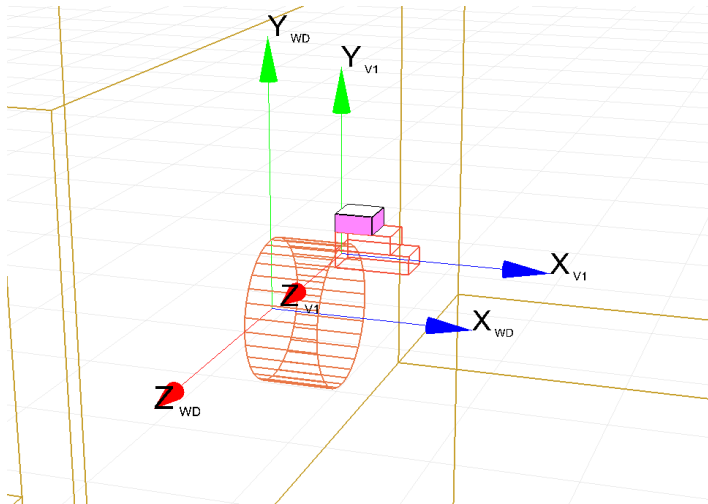


Рис. 6.4.7.4.3. Геометричні примітиви групи V1 в СК Пр РП

6.4.7.5. Опис елементів групи V2 Пр РП

```
Dv(Chuck)={
  CFP[(1500, 1100, 1300), (1, 0, 0, 0)]
  C{
    GP:[
      CR: 0, 0, 0, 100, 100;
    ]
  }
  V{
    LIM[(0, 100, 90, 0)(0, 100, 55, 0)(1, 0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)]
    GP: [
      PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50;
      PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50;
      PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50;
    ]
  }
}
```

}
V{
LIM[(0, 100, -50, 80)(0, 100, -20, 50)(0.500,0.866,0,0)(0.500,0.866,0,0)]
GP: [
PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50;
PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50;
PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50;
I
I
}

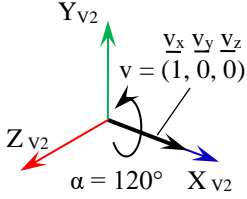
Тут:

V – ідентифікатор групи рухомих (variable) елементів Пр РП

LIM – ідентифікатор обмежень групи V2

LIM[(0, 100, -50, 80)(0, 100, -20, 50)(0.500,0.866,0,0)(0.500,0.866,0,0)]

0.500, 0.866, 0, 0 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) СК групи V2 в СК Пр РП



$$Q_{\max} = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) =$$

$$= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) =$$

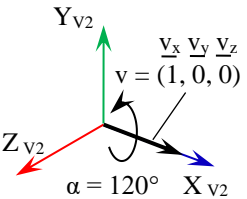
$$= \left(\cos \frac{120^\circ}{2}, \right.$$

$$\left. 1 \cdot \sin \frac{120^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{120^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{120^\circ}{2} \right) =$$

$$= (\cos(60^\circ), \sin(60^\circ), 0, 0) =$$

$$= (0.500, 0.866, 0, 0)$$

0.500, 0.866, 0, 0 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) СК групи V2 в СК Пр РП



$$Q_{\min} = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) =$$

$$= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) =$$

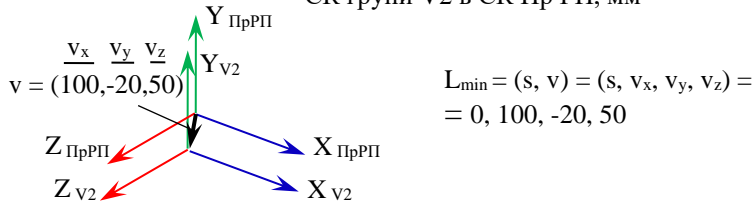
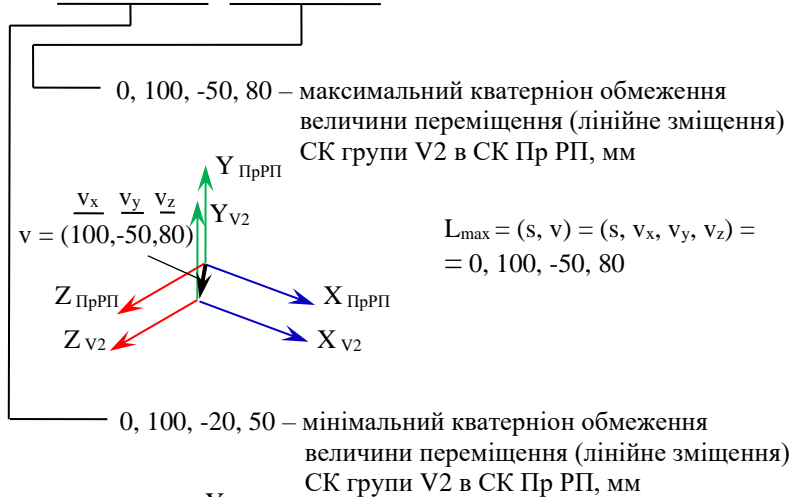
$$= \left(\cos \frac{120^\circ}{2}, \right.$$

$$\left. 1 \cdot \sin \frac{120^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{120^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{120^\circ}{2} \right) =$$

$$= (\cos(60^\circ), \sin(60^\circ), 0, 0) =$$

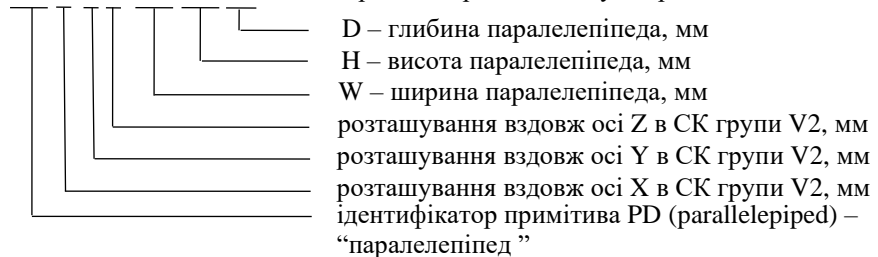
$$= (0.500, 0.866, 0, 0)$$

LIM[(0, 100, -50, 80)(0, 100, -20, 50)(0.500,0.866,0,0)(0.500,0.866,0,0)]



GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма Сх ПР

PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



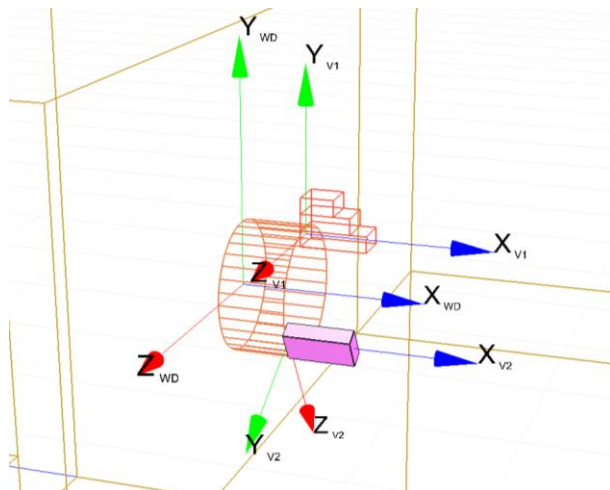
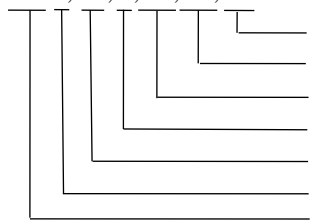


Рис. 6.4.7.5.1. Геометричні примітиви групи V2 в СК Пр РП

PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



- D – глибина паралелепіпеда, мм
- H – висота паралелепіпеда, мм
- W – ширина паралелепіпеда, мм
- розташування вздовж осі Z в СК групи V2, мм
- розташування вздовж осі Y в СК групи V2, мм
- розташування вздовж осі X в СК групи V2, мм
- ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

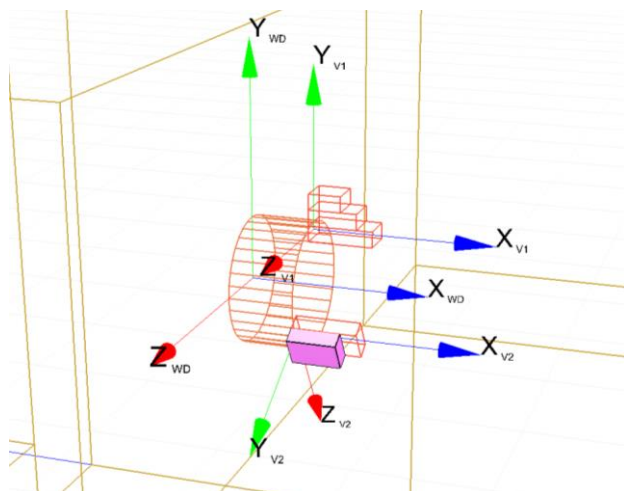


Рис. 6.4.7.5.2. Геометричні примітиви групи V2 в СК Пр РП

PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V2, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V2, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

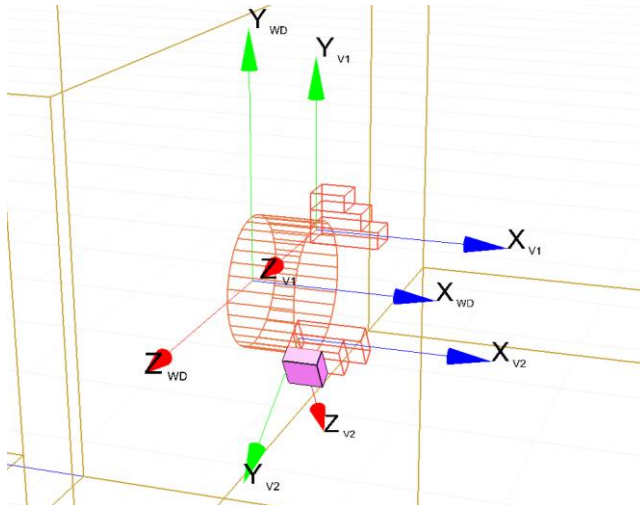


Рис. 6.4.7.5.3. Геометричні примітиви групи V2 в СК Пр РП

6.4.7.6. Опис елементів групи V3 Пр РП

```
Dv(Chuck)={
  CFP[(1500, 1100, 1300), (1, 0, 0, 0)]
  C{
    GP:[
      CR: 0, 0, 0, 100, 100;
    ]
  }
  V{
    LIM[(0, 100, 90, 0)(0, 100, 55, 0)(1, 0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)]
    GP: [
      PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50;
      PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50;
      PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50;
    ]
  }
}
```



```

}
V{
  LIM[(0, 100, -50, 80)(0, 100, -20, 50)(0.500,0.866,0,0)(0.500,0.866,0,0)]
  GP: [
    PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50;
    PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50;
    PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50;
  ]
}
V{
  LIM[(0,100,-50,-80)(0, 100,-20,-50)(0.500,-0.866,0,0)(0.500,-0.866,0,0)]
  GP:[
    PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50;
    PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50;
    PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50;
  ]
}
}

```

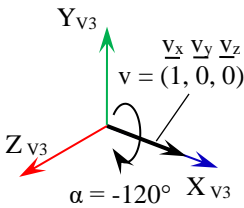
Тут:

V – ідентифікатор групи рухомих (variable) елементів Пр РП

LIM – ідентифікатор обмежень групи V3

LIM[(0, 100, -50, 80)(0, 100, -20, 50)(0.500,-0.866,0,0)(0.500,-0.866,0,0)]

0.500, 0.866, 0, 0 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) СК групи V3 в СК Пр РП

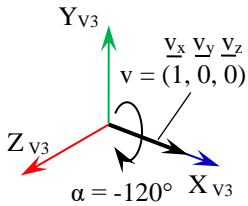


$$\begin{aligned}
 Q_{\max} &= (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) = \\
 &= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) = \\
 &= \left(\cos \frac{-120^\circ}{2}, \right. \\
 &\quad \left. 1 \cdot \sin \frac{-120^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-120^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-120^\circ}{2} \right) = \\
 &= (\cos(-60^\circ), \sin(-60^\circ), 0, 0) = \\
 &= (0.500, -0.866, 0, 0)
 \end{aligned}$$

LIM – ідентифікатор обмежень групи V3

LIM[(0, 100, -50, 80)(0, 100, -20, 50)(0.500,-0.866,0,0)(0.500,-0.866,0,0)]

0.500, -0.866, 0, 0 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (обертання) СК групи V3 в СК Пр РП



$$Q_{\min} = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) =$$

$$= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right) =$$

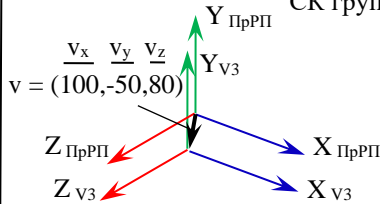
$$= \left(\cos \frac{-120^\circ}{2}, \right.$$

$$\left. 1 \cdot \sin \frac{-120^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-120^\circ}{2}, 0 \cdot \sin \frac{-120^\circ}{2} \right) =$$

$$= (\cos(-60^\circ), \sin(-60^\circ), 0, 0) =$$

$$= (0.500, -0.866, 0, 0)$$

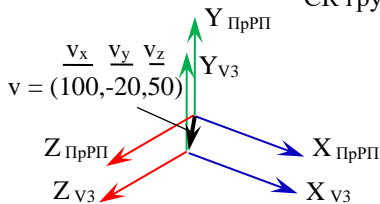
0, 100, -50, 80 – максимальний кватерніон обмеження величини переміщення (лінійне зміщення) СК групи V3 в СК Пр РП, мм



$$L_{\max} = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) =$$

$$= 0, 100, -50, 80$$

0, 100, -20, 50 – мінімальний кватерніон обмеження величини переміщення (лінійне зміщення) СК групи V3 в СК Пр РП, мм



$$L_{\min} = (s, v) = (s, v_x, v_y, v_z) =$$

$$= 0, 100, -20, 50$$

GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма Сх ПР

PD: 0, 0, 0, 100, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V3, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V3, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V3, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

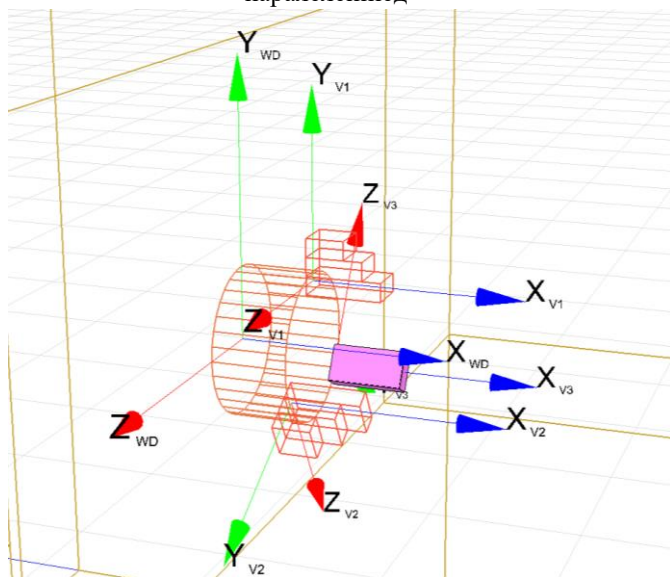


Рис. 6.4.7.6.1. Геометричні примітиви групи V3 в СК Пр РП

PD: 0, 25, 0, 75, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”

D – глибина паралелепіпеда, мм
 H – висота паралелепіпеда, мм
 W – ширина паралелепіпеда, мм
 розташування вздовж осі Z в СК групи V3, мм
 розташування вздовж осі Y в СК групи V3, мм
 розташування вздовж осі X в СК групи V3, мм
 ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

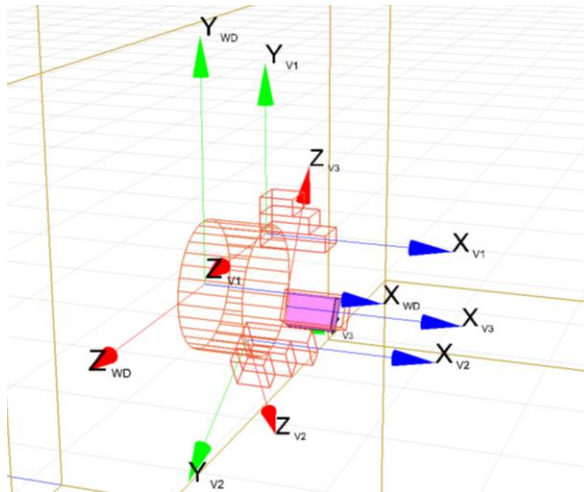
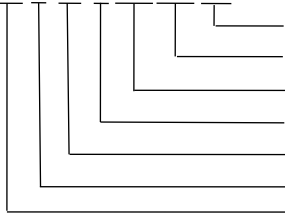


Рис. 6.4.7.6.2. Геометричні примітиви групи V3 в СК Пр РП

PD: 0, 50, 0, 50, 25, 50 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



D – глибина паралелепіпеда, мм

H – висота паралелепіпеда, мм

W – ширина паралелепіпеда, мм

розташування вздовж осі Z в СК групи V3, мм

розташування вздовж осі Y в СК групи V3, мм

розташування вздовж осі X в СК групи V3, мм

ідентифікатор примітива PD (parallelepiped) – “паралелепіпед”

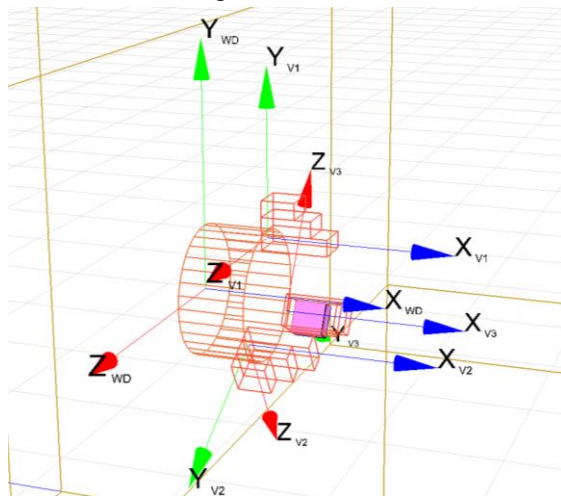


Рис. 6.4.7.6.3. Геометричні примітиви групи V3 в СК Пр РП

6.4.8. Формування ІМ перепони

6.4.8.1. Загальна інформація

Нижче на прикладі формалізованого опису перепони, що має форму паралелепіпеда (див. рис. 6.4.8.2.1), проілюстровано дії користувача при складанні ІМ цієї перепони для подальшої роботи із розробленим програмним продуктом.

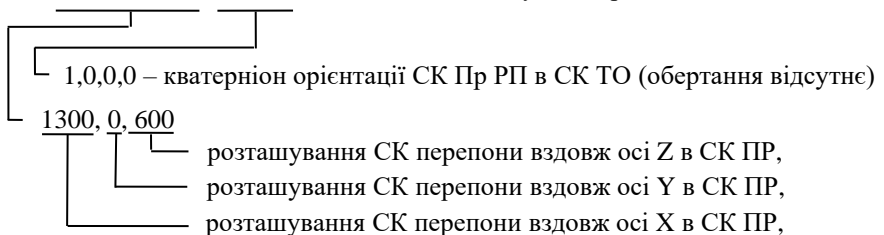
6.4.8.2. Опис перепони в СК ПР

```
Obstacle = {  
  CFP[(1300, 0, 600)(1, 0, 0, 0)]  
  C{  
    GP:[PD:0, 700, 0, 100, 1400, 500;]  
  }  
}
```

Здесь:

Obstacle – ідентифікатор перепони

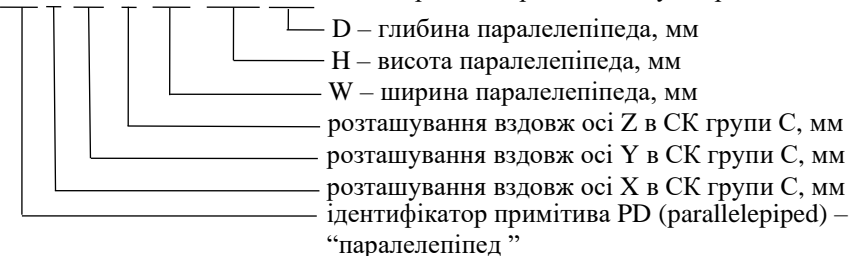
CFP[(1300, 0, 600)(1,0,0,0)] – зміщення початку СК перепони в СК ПР



GP: – ідентифікатор групи геометричних примітивів, за допомогою яких описується форма перепони

C – ідентифікатор групи нерухомих (constant) елементів перепони

PD: 0, 700, 0, 100, 1400, 500 – геометричний примітив типу “паралелепіпед”



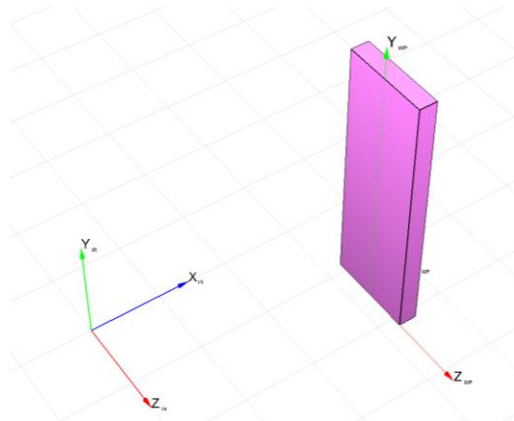


Рис. 6.4.8.2.1. Геометричні примітиви групи С в СК перепони

7. Порядок виконання роботи

1. За матеріалами виконаного курсового проекту з дисципліни "Обладнання, технологія і автоматизація дискретного виробництва" проаналізувати конструктивно-технологічні особливості структурних елементів ГПЯ для двох довільно вибраних студентом і узгоджених з викладачем РП ГВК. Побудувати інформаційні моделі обраних структурних складових ГВК з урахуванням того, що попередня (t-1)-та РП технологічно розвантажується, а наступна t-та РП – технологічно завантажується ПР. Відсутні вихідні дані визначити за результатами консультації з викладачем.

2. Ввести дані в програмний продукт "Robix", побудувати 3D-моделі елементів ГВК, *зробити знімок екрану* отриманої 3D-сцени ГВК.

3. Перейти на вкладку "Input data".

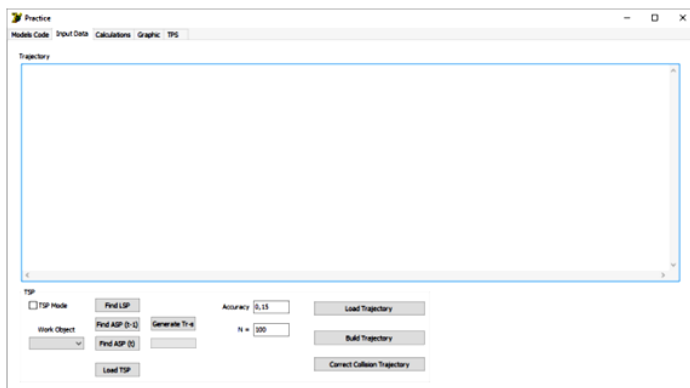


Рис. 7.1. Вкладка "Input data"

4. Вибрати OM_{t-1} із списку “Work Object” та ввімкнути режим визначення ТПС, поставити прапорець біля напису “TSP Mode” (рис. 7.2).

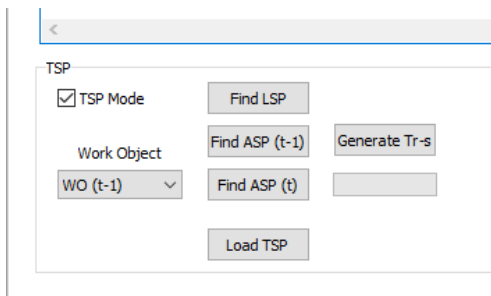


Рис. 7.2. Зображення панелі визначення ТПС (TSP)

5. Натиснути на кнопку “Find LSP”, вказати шлях до збереження файлів з розрахунками (наприклад створити папку з назвою “TSP” та вказати шлях до неї), дочекатись автоматичного визначення множини параметрів ЛПС.

6. Натиснути на кнопку “Find ASP (t-1)”, вказати шлях до збереження файлів з розрахунками (аналогічний за п. 5), дочекатись визначення множини параметрів КПС для PP_{t-1} .

7. Вибрати із списку “Work Object” OM_t (рис. 7.3).

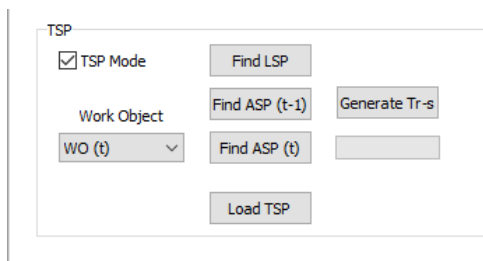


Рис. 7.3. Зображення панелі визначення ТПС

8. Натиснути на кнопку “Find ASP (t)”, вказати шлях до збереження файлів з розрахунками (аналогічно п. 5), дочекатись автоматичного визначення множини параметрів КПС для PP_t .

9. Натиснути на кнопку “Generate Tr-s”, вказати шлях до збереження файлів з розрахунками (створити папку з назвою “trajectories” та вказати шлях до неї), дочекатись генерації множини траєкторій між PP_{t-1} та PP_t .

10. Натиснути на кнопку “Find ASP (t-1)”, вказати шлях до збереження файлів з розрахунками (аналогічно п. 5), дочекатись визначення множини параметрів КПС.

11. Натиснути на кнопку “Load Trajectory”, вказати шлях до файлу траєкторії, згенерованої за п. 10.

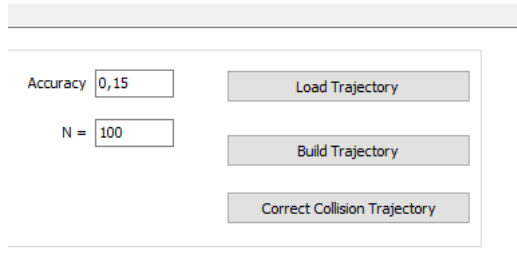


Рис. 7.4. Зображення панелі керування траєкторіями

12. Задати в полі “Ассигасу” значення точності МС ПР за його паспортними даними, мм.

13. Задати в полі “N” кількість точок траєкторії.

14. Зберегти координати опорних точок траєкторії та представити їх у вигляді таблиці.

15. Натиснути на кнопку “Build Trajectory”, дочекатись автоматичної побудови траєкторії.

16. Перейти на вкладку “Calculation”, натиснути на кнопку “Calculate Torque” (рис. 7.5). Зробити знімки екрану графіків на вкладці “Calculation”, та отриманої траєкторії на головній формі програмного продукту (рис. 7.6)

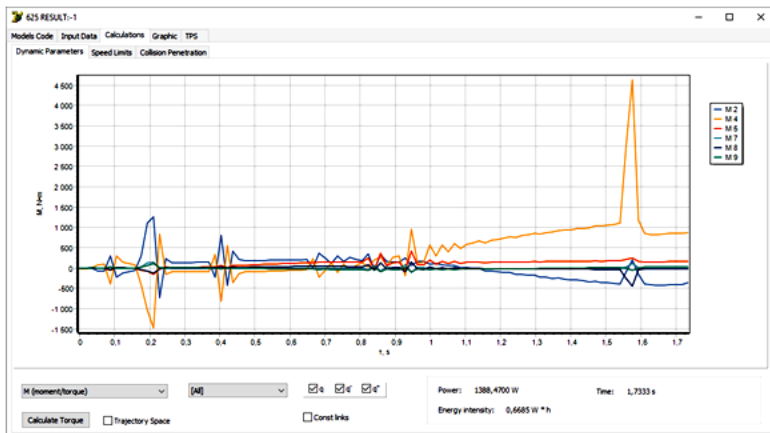


Рис. 7.5. Зображення вкладки “Calculation”(за прикладом розрахунків)

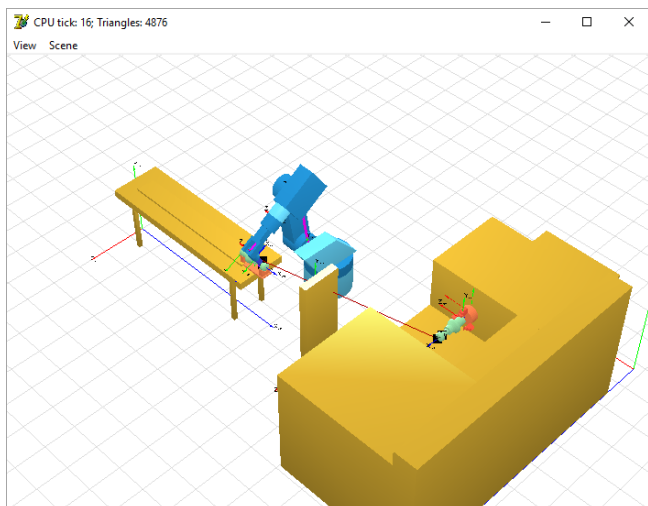


Рис. 7.6. Приклад побудованої траєкторії переміщення Sx на головній формі програмного продукту

17. Поставити папірець біля напису “Trajectory Space” (рис. 7.7), натиснути кнопку “Calculate Torque”, дочекатись автоматичної побудови траєкторного простору, зробити знімок екрану отриманого траєкторного простору на головній формі (рис. 7.8).

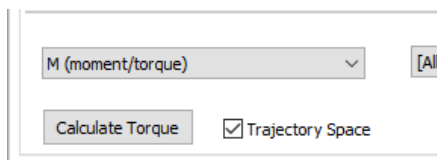


Рис. 7.7. Зображення перемикача побудови траєкторного простору для ТРК

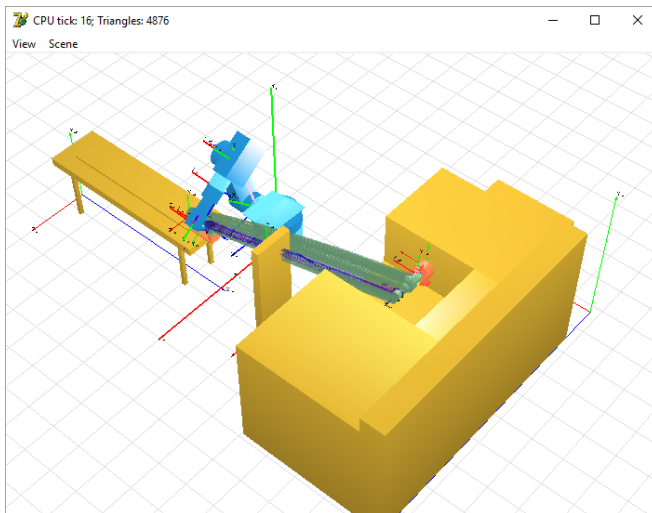


Рис. 7.8. Приклад побудованого траекторного простору на головній формі програмного продукту

18. Перейти на вкладку “Speed Limits” натиснути на кнопку “Refresh”, зробити знімок екрану графіка обмежень швидкості ланок (рис. 7.9).

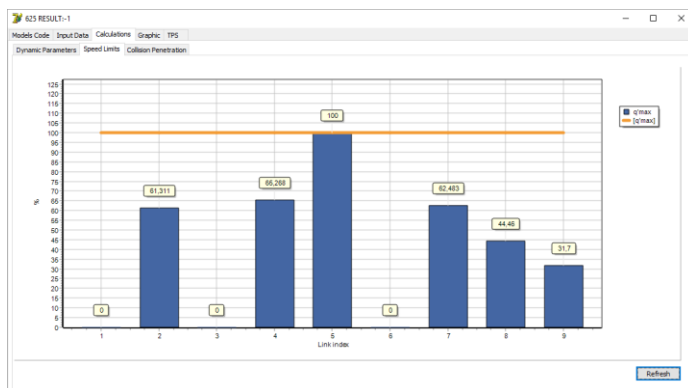


Рис. 7.9. Приклад графіка обмежень швидкості ланок МС ПР

19. Зафіксувати значення τ (час, в секундах) та E (енергоємність, в Вт·год) для розрахованої траекторії.

20. Перейти на вкладку “Collision Penetration”, натиснути кнопку “Refresh”, дочекатись побудови графіка зіткнень, зробити знімок екрану

(рис. 7.10), що відображає час початку та закінчення колізії, а також відповідні об'єми проникнення елементів ТРК в перепону.

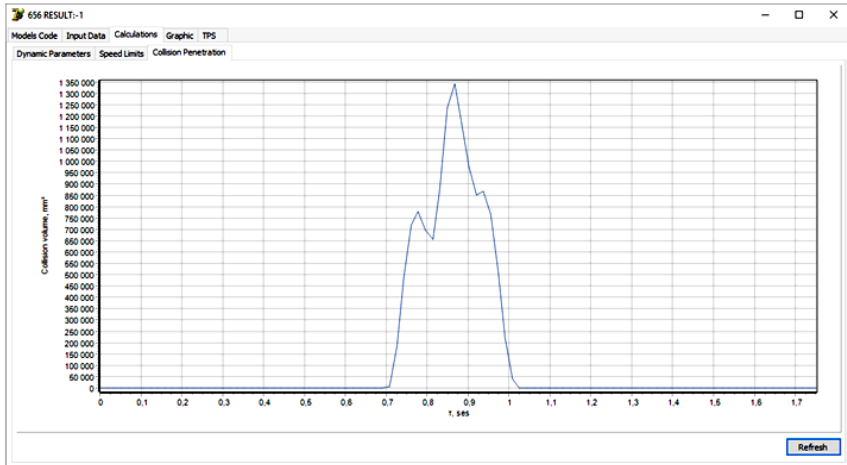


Рис. 7.10. Приклад графіка зіткнень для колізійної траєкторії ТРК

21. Перейти на вкладку “Input data”.

22. Натиснути на кнопку “Correct Collision Trajectory” на панелі керування траєкторіями, дочекатись процедури автоматичного корегування колізійної траєкторії.

23. Виконати аналогічні дії за пп. 16-18.

24. Зробити висновки по роботі.

25. Оформити звіт по роботі.

Зміст звіту наступний.

1. Назва циклу практичних робіт та їх мета.

2. Вихідні дані (за матеріалами курсового проекту) та їх аналіз, включаючи:

– опис обраної пари одиниць технологічного обладнання та промислового робота;

– їх технічні характеристики і конструктивні особливості;

– виконувані ПР технологічні операції і переходи при технологічному обслуговуванні обраних одиниць ТО;

– координати ТО в СК ПР, координати ПР для кожної РП в СК РП, технологічні ескізи ОМ з необхідними для подальших розрахунків масо-

габаритними та геометричними характеристиками ОМ при розвантаженні / завантаженні (технологічному обслуговуванні) ПР обраної пари ТО.

3. Виконати пп.1-23 даного р. 7 та представити їх в звіті.
4. Висновки.

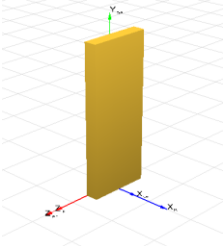
8. Варіанти індивідуальних завдань

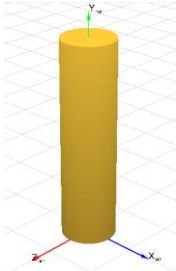
У таблиці 8 представлено варіанти індивідуальних завдань щодо форми та розмірів перепон. Варіант призначається викладачем індивідуально кожному студенту. Координати розташування кожної перепони в навчальних цілях вибираються таким чином, щоб побудована первинна траєкторія переміщення Сх з ОМ між двома обраними одиницями ТО (РП) проходила через перепону, тобто була колізійною. Розмір перепони і координати її розташування в СК ПР може бути змінений в разі неможливості автоматичного розрахунку корегованої траєкторії, що в більшості випадків обумовлене кінематичними можливостями МС ПР, розташуванням РП і перепони в СК ПР, геометричними та кінематичними параметрами ПР.

Перед виконанням робіт необхідно обов'язково проконсультуватися з керівником практичних робіт щодо особливостей змісту вирішуваних завдань.

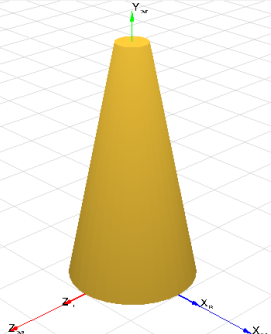
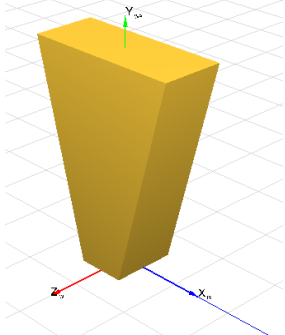
Таблиця 8

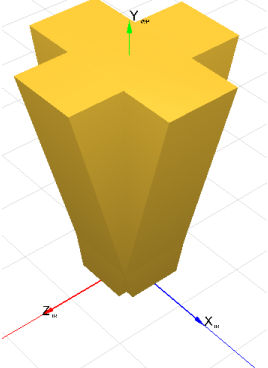
Варіанти індивідуальних завдань

№ з/п	Зображення перепони	ІМ перепони (програмний код)
1		<pre>{ CFP[(0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)] C{ GP:[PD:0, 700, 0, 100, 1400, 500;] } }</pre>

2		<pre>{ CFP[(0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)] C{ GP:[CR:0, 0, 0, 200, 1500, 0.71, 0, 0, 0.71;] } }</pre>
---	---	--

Закінчення таблиці 8

3		<pre>{ CFP[(0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)] C{ GP:[CE:0, 0, 0, 400, 100, 1500, 0.71, 0, 0, 0.71;] } }</pre>
4		<pre>{ CFP[(0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)] C{ GP:[TZ:0, 0, 0, 400, 1300, 300, 1000, 0, 0, 0.71, 0, 0, 0.71;] } }</pre>

5		<pre> { CFP[(0, 0, 0)(1, 0, 0, 0)] C{ GP:[TZ:0, 0, 0, 400, 1300, 300, 1000, 0, 0, 0.71, 0, 0, 0.71; TZ:0, 0, 0, 400, 1300, 300, 1000, 0, 0, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5;] } } </pre>
---	---	---

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богдановський М.В. Визначення метричної відстані між одиницями технологічного обладнання механообробних гнучких виробничих комірок при плануванні програмних траєкторій промислових роботів / М.В. Богдановський, А.В. Євгенєв, В.А. Кирилович, В.В. Чухов // Технологічні комплекси. – Луцьк, 2011. – № – 1(3). – С.23 – 31.
2. Ватульян А.О. Кватернионы // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 5. – С. 117–120.
3. Кантор И.Л., Солодовников А.С. Гиперкомплексные числа. – М.: Наука, 1973. – 144 с.
4. Кирилович В.А. Формування функціональних моделей схватів промислових роботів / В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, Р.С. Моргунов

- // Міжнародний збірник наукових праць “Прогресивні технології і системи машинобудування”. – Донецьк. – 2012. – вип. №1,2(44). – С.110–115.
5. Кирилович В.А. Узагальнена функціональна модель промислових роботів / В.А. Кирилович, Р.С. Моргунов // Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів. – 2012. – вип. №746. – С. 66–70.
 6. Кирилович В.А. Методично-програмне забезпечення визначення технологічних параметрів сервісу для тіл обертання / В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, Р.С. Моргунов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: Науковий журнал. – Херсон: Видавництво ХДМА, 2013. – №1 (8). – С.225–232.
 7. Кирилович В.А. Щодо інформаційних моделей пристосувань технологічного обладнання /В.А. Кирилович, Р.С. Моргунов // ”Інформаційно-комп’ютерні технології 2012”,: тези VI Міжнар. Наук.-техн. Конф., 4–6 жовтня 2012р. – Житомир: ЖДТУ, 2012 – 68с. – С.15–17.
 8. Мельничук П. П. Семантична модель технологічної взаємодії сватів промислових роботів з об’єктами маніпулювання / П. П. Мельничук, В. А. Кирилович, Р. С. Моргунов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – Житомир. – 2011. – №1(56). – С.24–31.
 9. Мельничук П. П. Задачі технологічної взаємодії схватів промислових роботів з об’єктами маніпулювання в механоскладальних гнучких виробничих комірках / П. П. Мельничук, В. А. Кирилович, Р. С. Моргунов // Збірник наукових праць Житомирського державного технологічного університету “Процеси механічної обробки в машинобудуванні”. – Житомир. – 2011. – вип. №10. – С.24–41.
 10. Шахинпур М. Курс робототехніки / М. Шахинпур // Пер. с англ. – М. Мир, 1990 – 527 с.
 11. Hamilton, Sir William Rowan. Hamilton Elements of Quaternions article 285. – 1866. – P. 310.
 12. Hamilton. Elements of Quaternions (2nd ed.). – 1899. – p. 244.
 13. Melnychuk P. The use of the theory of quaternions for forming the functional models of industrial robots’ grippers / Melnychuk P., Kyrylovych V., Morhunov R. // Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. – Mechanika. – z.84(nr 1/2012). – S.35–41.
 14. Saha, S.K. Introduction to Robotics. – McGraw-Hill Education (India). – 2008. – 400 p.

Навчальне видання

КИРИЛОВИЧ Валерій Анатолійович
МОРГУНОВ Роман Сергійович
ДІМІТРОВ Любомір Ванков
МЕЛЬНИЧУК Петро Петрович

Передові технології в автоматизованому виробництві. Практикум

**Навчально-методичний посібник для виконання практичних занять
з курсу “Передові технології в автоматизованому виробництві”
студентами спеціальності 151
“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”**

Редактор
Комп’ютерний набір та верстка

В.А. Кирилович
Р.С. Моргунов

Підп. до друку __.07.2016 р. Формат 60×84 1/16.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Ум друк. арк. 14,9.
Тираж 100 пр. Замовлення № ____.
