

**Лекція 12**  
**МОДЕЛЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ**  
**СХВАТІВ (ЗАТИСКНИХ ПРИСТРОЇВ) ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ**

**12.1. Теоретичні відомості**

**12.1.1. Загальні відомості про точнісні характеристики промислових роботів**

Однією із найважливіших складових ГВС є промислові роботи (ПР), що у складі із ОТО, ДТО та ЗУС утворюють гнучкі виробничі комірки (ГВК).

Використання ПР в сучасному гнучкому автоматизованому виробництві передбачає їх вибір та верифікацію експлуатаційних можливостей кожного із обраних ПР на етапі проектування ГВК як складової ГВС.

Незалежно від виду, складності та призначення технологічних структур, в яких реалізуються відповідні ТП, включаючи механоскладальні з використанням ПР, точність є одним із необхідних та найважливіших показників, що враховуються при проектуванні ГВК, зокрема автоматизованому синтезі (АС) роботизованих механоскладальних технологій (РМСТ), тому що саме точність ПР значною мірою визначає техніко-економічні показники технологічної дії на ОМ та отримання виробів в цілому щодо їх якості, продуктивності, вартості тощо.

Ефективність застосування ПР значною мірою визначається відповідністю обраного ПР і його точнісних характеристик заданому ТП. В зв'язку з цим необхідним є проведення попереднього аналізу точнісних характеристик ПР для однозначного визначення їх складу та змісту.

Точність ПР є комплексним поняттям, що включає в себе позиційні та траєкторні складові, кожна з яких характеризує особливості конструкції маніпуляційної системи (МС) аналізованого ПР, особливості системи керування ПР тощо.

Основні компоненти точнісних характеристик представлені на рис. 12.1.

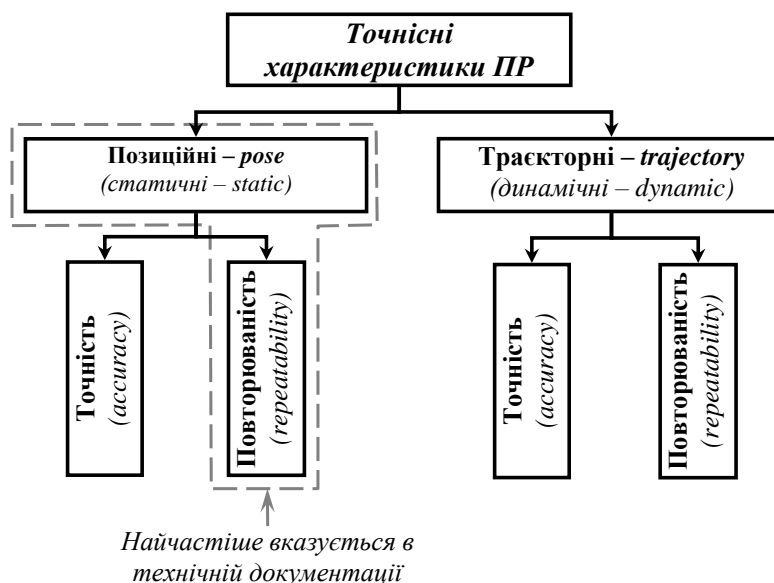


Рис. 12.1. Основні точнісні характеристики сучасних ПР

**Повторюваність (repeatability)** – це відхилення характеристичної точки робочого органу (РО) ПР в процесі здійснення багаторазових повторюваних рухів в одну і ту ж точку робочої зони (РЗ) при однаковій конфігурації ланок МС ПР та послідовності (одночасності) і величини переміщень відповідних ланок.

Характеристичною точкою РО ПР в загальному випадку можна розглядати полюс схвата (Сх) ПР ( $P_{Cx}$ ), або будь-яку іншу точку в тому випадку, коли замість СхПР до останньої ланки МС ПР кріпляться технологічні засоби, наприклад, зварювальні кліщі, складальні пристрої тощо, що безпосередньо виконують технологічні операції над ОМ та мають відповідні координати ( $X, Y, X$ ) в системі координат (СК), а значить в робочій зоні (РЗ) ПР.

**Точність (accuracy)** – зворотна величина *похибки (error)*, яка характеризується величиною відхилення координати фактичного положення характеристичної точки ПР від ідеального положення, заданого системою керування ПР.

Отже **точність позиціонування (pose accuracy)** виражає відхилення положення, досягнутого РО ПР, від положення, заданого системою керування.

**Точність позиціонування (pose accuracy або accuracy pose – AP)** є узагальнюючим поняттям, оскільки включає в себе величини похибок позиціонування та позиційної повторюваності, що в свою чергу породжені

великою кількістю як випадкових, так і систематичних впливів (рис. 12.2), зокрема похибками, що діють з боку системи керування, механічної та привідної систем ПР.

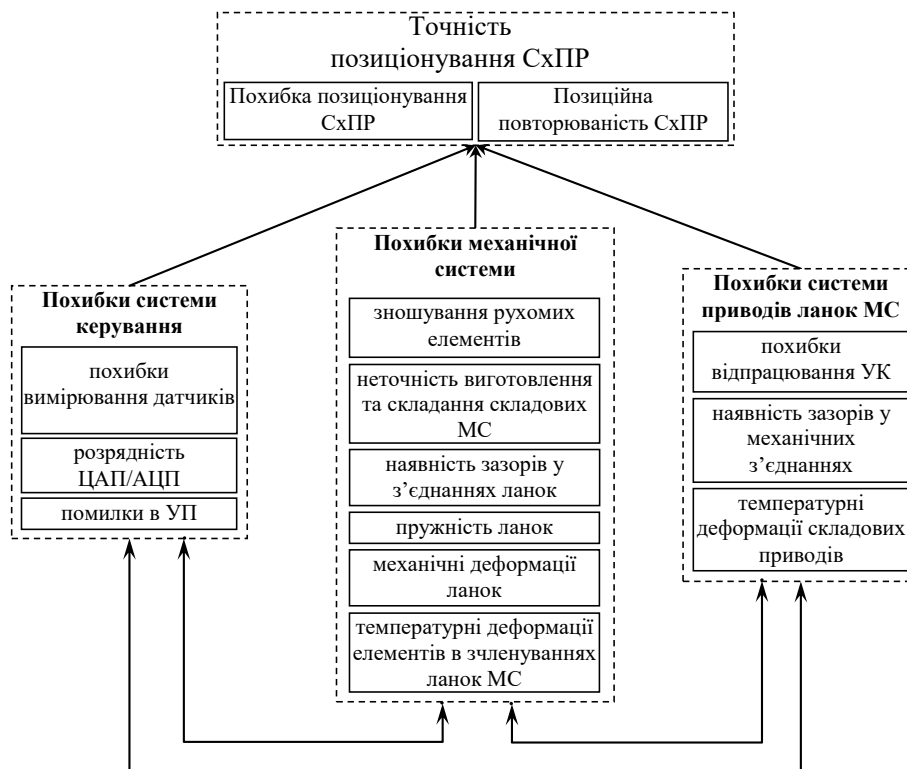


Рис. 13.2. Узагальнена схема формування точності ПР

Точність позиціонування, графічне представлення якої зображено на рис. 12.3, також має назву *статична точність* (*static accuracy*) і визначається як середньоквадратична похибка переміщення робочого органа ПР в задану точку  $P_c(x_c, y_c, z_c)$  та розраховується за виразом (12.1):

$$\Delta_{ПРi} = AP = \sqrt{(\bar{x}_i - x_{ic})^2 + (\bar{y}_i - y_{ic})^2 + (\bar{z}_i - z_{ic})^2}, \quad (12.1)$$

де  $x_{ic}, y_{ic}, z_{ic}$  – координати  $P_{Сх}$  в  $i$ -ій точці РЗ, заданій системою керування ПР;

$\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$  – середні арифметичні значення координат фактичного положення РО ПР при  $K$  переміщеннях в  $i$ -ту точку РЗ:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K x_{ik}; \quad \bar{y}_i = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K y_{ik}; \quad \bar{z}_i = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K z_{ik}, \quad (12.2)$$

тут  $x_{ik}, y_{ik}, z_{ik}$  – координати фактичного положення РО, отримані після  $k$ -го повторення однакового переміщення РО в  $i$ -ту точку.

Для визначення точнісних характеристик ПР та верифікації його експлуатаційних можливостей при технологічному обслуговуванні одиниць ОТО та ДТО використовується метод атестації його (ПР) РЗ.

Під **атестацією РЗ ПР** (як процесу) розуміється визначення сумарної похибки позиціонування СхПР як функції узагальнених координат (УК) ПР та точності їх відпрацювання в аналізованих конкретних точках РЗ ПР.

На сьогодні відомою є **апаратна точнісна атестація**, що передбачає використання реального технологічного обладнання (ПР, ОТО, ДТО тощо) та засобів вимірювання і контролю положення СхПР.

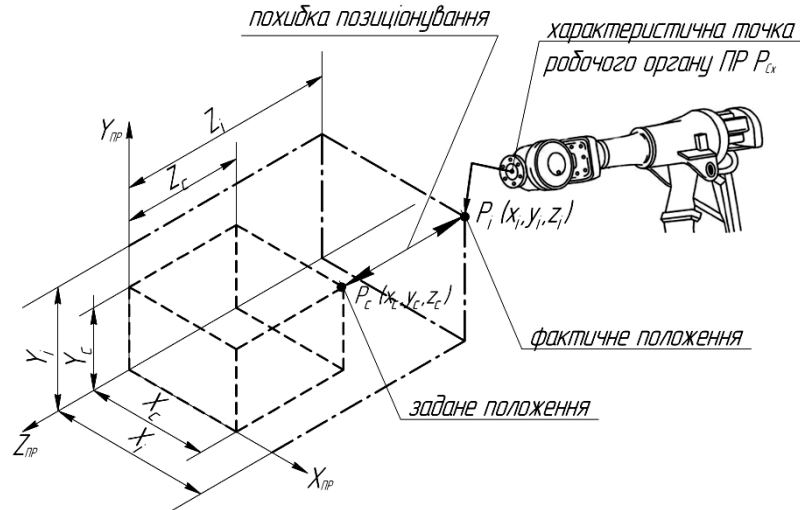


Рис. 12.3. Графічне представлення формування точності позиціонування ПР

Вказаний метод володіє рядом *недоліків*:

1. необхідність проведення дорогих і трудомістких натурних експериментів на реальному обладнанні;
2. наявність додаткових апаратних засобів визначення координат положення СхПР;
3. значні енергетичні затрати, особливо при багаторазових дослідженнях точнісних параметрів РЗ ПР;
4. затрати часу на налагодження та переналагодження вимірювальних стендів;
5. матеріально-фінансові затрати на технічне обслуговування додаткового вимірювального обладнання;
6. порівняно великі втрати часу на точнісні дослідження в умовах реального обладнання та реальних виробничих умов.

Очевидно, що вказані недоліки накладають суттєві обмеження на область застосування такого методу точнісної атестації.

Для зменшення впливу вказаних недоліків при проектуванні ГВС доцільним є проведення моделювання точнісних характеристик ПР засобами обчислювальної техніки. Моделювання точності позиціонування СхПР виконується із використанням оригінального програмного забезпечення IRWSAES (Industrial Robots' Working Space Accuracy Examination Software).

### 12.1.2. Формалізація кінематичних можливостей маніпуляційних систем промислових роботів

Точність позиціонування ПР нерозривно зв'язана з кінематичною структурою його МС. Необхідною початковою інформацією для проведення моделювання точності позиціонування ПР є дані щодо функціональних можливостей ланок МС ПР та його Сх, величин переміщень ланок тощо, що враховується на етапі вибору, планування та розміщення обладнання при технологічному проектуванні ГВК.

Зазначена інформація представляється у вигляді формалізованих описів МС ПР за допомогою опису їх так званих просторово-кінематичних структур (ПКС). За основу формування ПКС покладено два аспекти: просторовий та кінематичний.

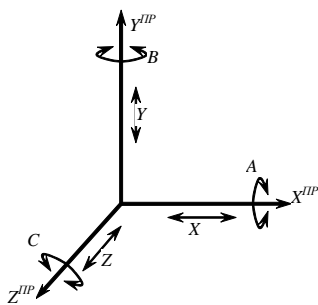


Рис. 12.4. Базова (права) система координат та позначення елементарних рухів, що реалізуються в ній

Основою *кінематичного аспекту* опису є кінематична структура та склад виконуваних робочим органом ПР елементарних рухів. Ці рухи ідентифіковані векторами координатних напрямків, що виконуються схватом ПР вздовж та (або) навколо осей прийнятої системи координат (рис. 12.4) і називаються операторами координатних напрямків (ОКН). В термінах ОКН описуються види рухів кожної ланки МС ПР відносно попередньої, а також відносна рухомість ланок.

В основу просторового аспекту опису покладені такі характеристики ланок як розмір, початкова орієнтація в просторі, величина та координатний напрямок їх переміщення, тобто узагальнені координати (УК).

Таким чином, опис  $i$ -ої ланки МС ПР представляється у вигляді:

$$l_{ic} O_i \tau_i (l_{iv}), \quad (12.3)$$

де  $l_{ic}$  – розмір  $i$ -ої ланки, що визначається особливостями її конструкції, так звана міжланкова відстань (постійна частина розміру);

$O_i$  - позначення осі, вздовж якої конструктивно розташована  $i$ -та ланка:  $O_i \in \{X, Y, Z\}$ ;

$\tau_i$  – вид руху  $i$ -ої ланки (тобто позначення ОКН), причому якщо дана ланка рухається прямолінійно або паралельно осі, вздовж якої вона конструктивно розташована (тобто при  $O_i // \tau_i$ ), то  $\tau_i$  по замовчужанню не вказується; якщо вказані переміщення відсутні,  $\tau_i = \mathbf{0}$ :

$$\tau_i \in \left\{ \begin{array}{l} X, Y, Z, A, B, C, O | \forall \tau_i \parallel O_i \\ A, B, C, O | \forall \tau_i \parallel O_i \end{array} \right\},$$

$l_{iv}$  – величина переміщення  $i$ -ої ланки (змінна, варіативна частина розміру) для лінійних переміщень:

$$l_{iv} \in \{[X], [Y], [Z], [A], [B], [C]\}$$

$X, Y, Z$  – позначення лінійних ОКН, що виконуються вздовж однойменних координатних осей;

$A, B, C$  – позначення обертальних ОКН навколо осей  $X, Y, Z$  відповідно;

$[X], [Y], [Z]$  – абсолютні величини переміщень при відпрацюванні відповідних однойменних ОКН;

$[A], [B], [C]$  – абсолютні величини обертальних переміщень  $i$ -ої ланки відповідно навколо осей  $X, Y, Z$ .

Таким чином, в загальному випадку ПКС  $r$ -ої моделі ПР являє собою упорядковану множину (кортеж) послідовно з'єднаних операторами зв'язку  $S$  в напрямку від стійки до схвату формалізованих описів ланок кінематичного ланцюга МС ПР:

$$\begin{aligned} PKS(r) &= \langle l_{ic}, O_i, \tau_i, l_{iv}, S_j, K_{O_i} | i = \overline{1, I-1}; l_{ic} \in \{[X], [Y], [Z]\}; \\ &O_i \in \{X, Y, Z\}; l_{iv} \in \{[X], [Y], [Z], [A], [B], [C]\}; \\ &S_j \in \{\vee, \nabla, \wedge\}, j = \overline{1, I-1}; \\ &\tau_i \in \left\{ \begin{array}{l} X, Y, Z, A, B, C, O | \forall \tau_i \parallel O_i \\ A, B, C, O | \forall \tau_i \parallel O_i \end{array} \right\rangle. \end{aligned} \quad (12.4)$$

Тут  $I$  – загальна кількість ланок кінематичного ланцюга  $r$ -го ПР;

$\vee, \nabla, \wedge$  – знаки диз'юнкції, роздільної диз'юнкції та кон'юнкції що позначають порядок реалізації ОКН (відносну рухливість ланок) і змістовно відповідають однойменним операціям математичної логіки;

$K_{O_i}$  – умовне позначення кінцевого елемента кінематичного ланцюга ПР – схвата із зазначенням осі, вздовж або паралельно якій можливий підхід схвата до об'єкта маніпулювання (заготовки, деталі), робочої позиції тощо.

З рівняння (12.3) та (12.4) маємо:

$$PKS(r) = \{l_{1c} O_1 \tau_1(l_{1v}) S_1 l_{2c} O_2 \tau_2(l_{2v}) S_2 \dots l_{ic} O_i \tau_i(l_{iv}) S_i \dots l_{Ic} O_I \tau_I(l_{Iv}) S_I\} K_{O_i}, \quad (12.5)$$

Таким чином, формули (12.4) та (12.5) є фактично формалізованим описом (ФО) ПКС. Очевидно, що для проведення формалізації ПКС необхідна інформація, що знаходиться в паспортах, керівництвах по експлуатації, довідниках ПР та інших інформаційних джерелах у вигляді технічних характеристик ПР.

Виходячи із вищевказаного, *ПКС конкретної моделі ПР формується в наступному порядку:*

1. складається схема кінематичного ланцюга МС ПР, що розташовується, як правило, в площині  $ХОУ$  (площина креслення) прийнятої за базову правої системи координат. При цьому вісь  $OX$  розташовується горизонтально, а  $OY$  – вертикально. Таким чином, ланки ПР, конструктивно виконані в горизонтальній площині, на схемі зображуються паралельно  $OX$ ; ланки, що розташовані вертикально, зображуються паралельно  $OY$  решта – паралельно  $OZ$ , що доповнює прийняту систему координат до правої;

2. схема складається в так званому початковому стані ланок, тобто при "нульових" початкових переміщеннях  $l_{iv} = \mathbf{0}$  (наприклад, їх "втягнутому" положенні при поступальному переміщенні ланки) з урахуванням конкретних значень  $l_k \neq \mathbf{0}$ . Обертальні ступені рухомості зображуються на схемі з осями, паралельними осям базової системи координат, і орієнтують відповідні ланки паралельно координатним осям (рис. 12.4);

3. виконується нумерація ланок в напрямку від стійки до схвату;

4. на схемі позначаються параметри  $\tau_i, l_{ic}, l_{iv}$ ;

5. з використанням наявної довідниково-нормативної літератури та інших інформаційних джерел виконується формалізований опис МС ПР згідно (12.3), (12.4) та (12.5) послідовно розташованих ланок, що з'єднуються за допомогою символів операторів зв'язку  $S_j$ .

Приклад формалізованого опису (моделі) МС ПР може бути представлений наступним чином:

$ПР(1) = (100YB(-180) \vee 120Y(80) \vee 250ZC(45) \vee 150ZC(-45) \vee 70ZC(10) \vee 450ZC(90)) \vee K_c$	$\Delta_{to1} = \pm 1,5 \text{ мм}$
--	-------------------------------------

Примітка: Величини зміни УК:

обертальні  $A = (+360; -360)$ ;  $B = (+180; -180)$ ;  $C = (+180; -100)$ ;

лінійні:  $X = (+100; -100)$ ;  $Y = (+100; -100)$ ;  $Z = (+100; -100)$ .

Як випливає із аналізу поданої таким чином інформації, що дозволяє виконувати її автоматизовану обробку, ПКС містить дані, необхідні для розв'язування таких локальних задач технологічного проектування ГВК, як визначення маніпуляційних можливостей роботів, вибір ПР за геометричними характеристиками (формою, об'ємом та площею) робочих зон, а також формування бази даних ПР, що вкрай важливо при створенні автоматизованих систем технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв (АС ТП РМСВ).

### 12.1.3. Опис програмного забезпечення для моделювання точнісних характеристик маніпуляційних систем промислових роботів

Основне вікно графічного інтерфейсу користувача (рис. 12.5) ПЗ IRWSAES складається із 4-ох блоків.

Для проведення програмної точнісної атестації РЗ ПР необхідним є введення початкових даних про кінематичні особливості МС ПР, що виконується в блоці 1 графічного інтерфейсу користувача.

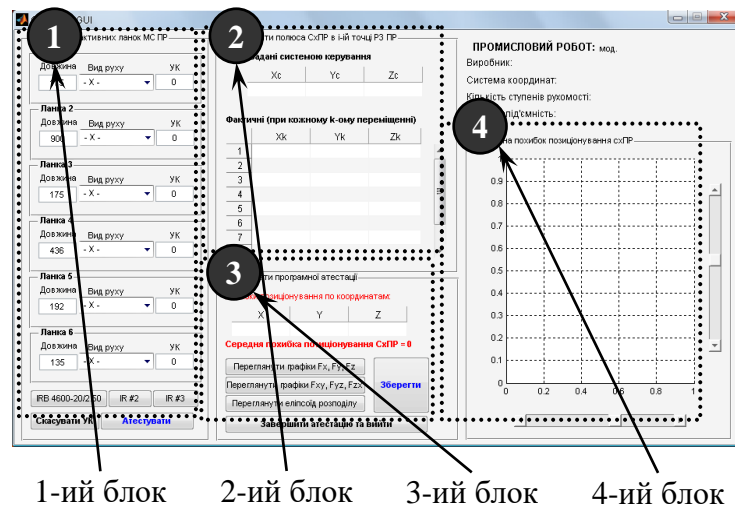


Рис.12.5. Основне вікно IRWSAES

Перший блок – “Узагальнені координати” забезпечує введення даних про кінематичні особливості МС ПР. В блоці задаються значення УК в зчленуваннях активних ланок МС ПР, що реалізують переміщення СхПР в  $i$ -ту точку РЗ ПР. Натисканням на елемент управління Push Button (“Атестувати”) запускається на виконання програмний код. В результаті визначаються координати заданої системою керування ПР  $i$ -ої точки РЗ ПР та проводиться її атестація.

В результаті атестації визначається множина  $i_k = (x^{ik}, y^{ik}, z^{ik})$  фактичних координати  $i$ -ої точки РЗ при багаторазовому  $(i_1, \dots, i_k, \dots, i_K | K = \overline{1,100})$  позиціонуванні Сх в цій ( $i$ -ій) точці РЗ ПР.

На базі вхідної інформації, введеної в блок 1 графічного інтерфейсу користувача, однойменним підмодулем модуля атестації РЗ ПР виконується формування кінематичної моделі МС ПР. Проміжні результати функціонування модуля виводяться в другому блоці графічного інтерфейсу користувача.

Другий блок – “Координати полюса СхПР в  $i$ -ій точці РЗ ПР” забезпечує виведення проміжних результатів програмної точнісної атестації РЗ ПР: координат заданої системою керування  $i$ -ої точки РЗ ПР та множин  $i_k | k = \overline{1, K}$  фактичних координат положення СхПР в  $i$ -ій точці РЗ ПР, що отримана за результатами функціонування підмодуля формування кватерніонної точнісної моделі МС ПР модуля атестації РЗ ПР.

Третій блок – “Результати програмної атестації”. Функціонування цього підмодуля аналітичних розрахунків модуля статистичного аналізу атестаційних даних забезпечує виведення результатів програмної точнісної атестації  $i$ -ої, заданої системою керування, точки РЗ ПР: похибок позиціонування СхПР за координатами  $i$ -ої точки РЗ ПР  $(x^i, y^i, z^i)$ ; середньої похибки позиціонування за всіма координатами. За допомогою об'єктів “Переглянути графіки  $F_x, F_y, F_z$ ”, “Переглянути графіки  $F_{xy}, F_{yz}, F_{zx}$ ”, “Переглянути еліпсоїд розподілу”, елементами управління яких є Push Button класу Button, реалізована можливість перегляду та збереження графіків щільності функцій розподілу похибок позиціонування СхПР в  $i$ -ій точці РЗ ПР за кожною координатою:  $F(x), F(y), F(z)$ ; композиції функцій щільності розподілу похибок позиціонування попарно для трьох осей координат:  $F(xy), F(yz), F(zx)$  та еліпсоїду розподілу  $F(xyz)$  похибок позиціонування СхПР в  $i$ -ій точці РЗ ПР. В даному блоці реалізована можливість експорту результатів програмної точнісної атестації в зовнішнє програмне забезпечення, а саме табличний процесор Excel та будь-який сумісний табличний процесор, наприклад, OpenOffice.org Calc та їх збереження у форматі \*.xls. Вказана можливість характеризує гнучкість IRWSAES і дозволяє зручно, без особливих вимог до комп'ютерної кваліфікації користувача проводити точнісний аналіз РЗ ПР та приймати відповідні рішення при проектуванні ГКІС механоскладання.

Четвертий блок – “Множина похибок позиціонування СхПР” забезпечує візуалізацію отриманих результатів функціонування підмодуля формування кватерніонної точнісної моделі МС ПР модуля атестації РЗ ПР, що виконує програмну точнісну атестацію РЗ на основі сформованої множини  $i_k$ -их координат фактичних точок позиціонування Сх при його багаторазовому переміщенні в задану системою управління  $i$ -ту точку РЗ. Візуалізація забезпечується елементом керування Axes, що червоним кольором відображає множину точок  $i_k$ , а чорним – задану системою керування  $i$ -ту точку РЗ.

### 12.1.4. Робота з програмним забезпеченням IRWSAES

Для проведення програмної точнісної атестації робочої РЗ ПР з використанням розробленого програмного забезпечення IRWSAES в блоці 1 (рис. 13.6) вводяться початкові дані: особливості кінематичної структури МС ПР, а саме лінійні розміри ланок, види рухів активних ланок та величини їх переміщень, що забезпечують переміщення та позиціонування СхПР в  $i$ -ій точці РЗ. Види рухів, що відпрацьовуються в зчленуваннях ланок МС, є: лінійними УК  $LIN_{l,1}^i \in (X, Y, Z) \Rightarrow LIN_{l,1}^i = (X \vee Y \vee Z)$  та кутовими УК  $ROT_{l,1}^i \in (A, B, C) \Rightarrow ROT_{l,1}^i = (A \vee B \vee C)$ . Величини УК в зчленуваннях  $l$ -ої та  $(l-1)$ -ої ланок вказуються у міліметрах при лінійних рухах в зчленуваннях ланок МС ПР або в градусах при кутових УК.

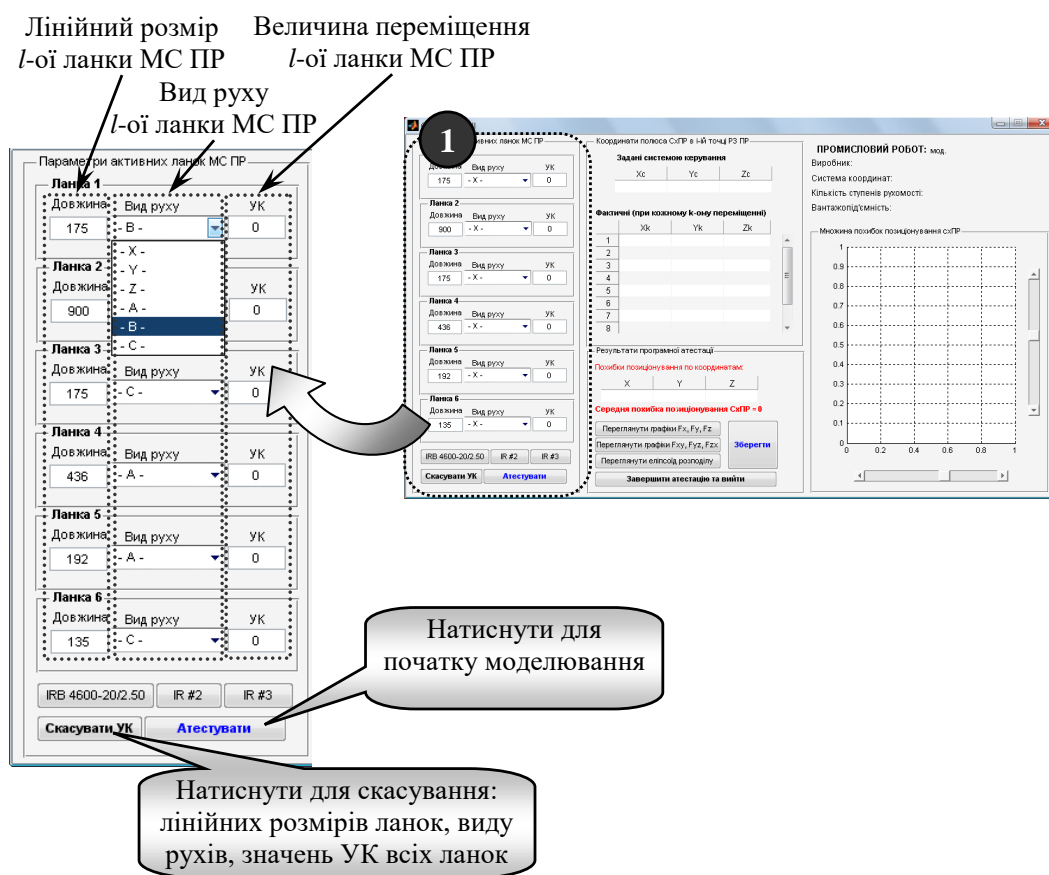


Рис. 12.6. Задання початкових даних для процесу моделювання

Натисканням на кнопку “Атестувати” запускається модуль атестації РЗ ПР, що дозволяє визначити координати  $(x^i, y^i, z^i)$  положення  $i$ -ої, заданої системою керування ПР, точки РЗ та генерує послідовні багаторазові ( $K=100$ , де  $K$  – кількість послідовних переміщень в  $i$ -ту точку РЗ ПР) переміщення в цю ж саму точку і визначає координати  $(x^{i_k}, y^{i_k}, z^{i_k})$  фактичних точок  $i_k$ , що утворені багаторазовим переміщенням СхПР в  $i$ -ту точку РЗ ПР з врахуванням похибок в зчленуваннях активних ланок МС ПР. Отримані координати  $i$ -ої та множина координат  $i_k$ -ої точок позиціонування автоматично виводяться в блок 2 (рис. 12.7).

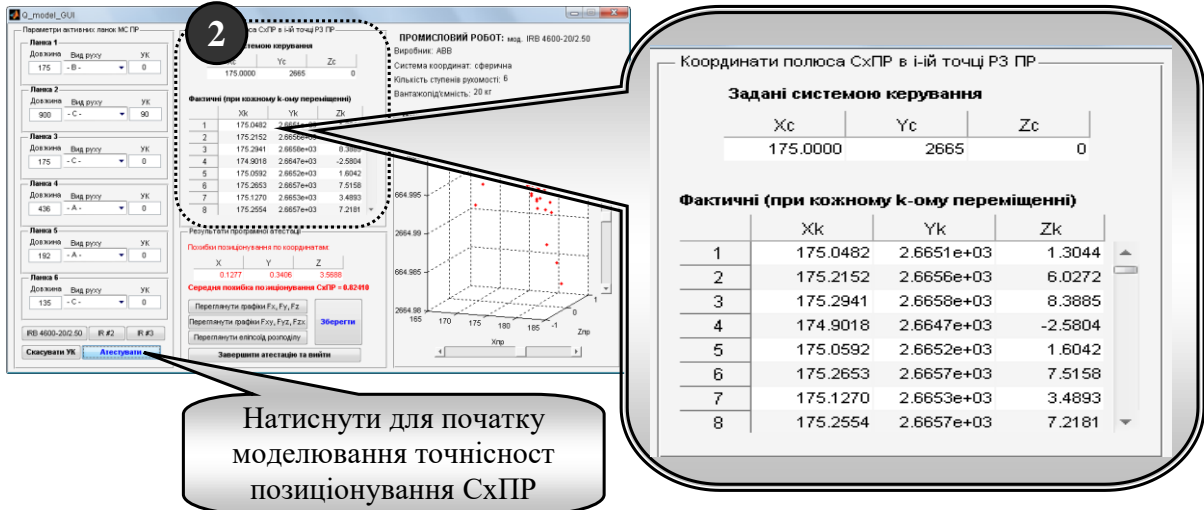


Рис. 12.7. Виведення проміжних результатів моделювання – координат положення  $i$ -ої та множини координат  $i_k$ -ої точок позиціонування СхПР

Аналіз отриманої множини  $i_k$  координат точок позиціонування СхПР при багаторазовому його переміщенні в  $i$ -ту точку РЗ ПР включає в себе визначення середньої похибки позиціонування за кожною координатою  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  та загальної похибки позиціонування СхПР в  $i$ -ій точці РЗ  $\Delta_{mod}$ . Визначаються функції щільності розподілу похибок позиціонування СхПР в  $i$ -ій точці РЗ за кожною координатою:  $F(x)$ ,  $F(y)$ ,  $F(z)$ ; композиції функцій щільності розподілу похибок позиціонування попарно для трьох осей координат  $F(xy)$ ,  $F(yz)$ ,  $F(xz)$  та еліпсоїду розподілу  $F(xyz)$  похибок позиціонування СхПР в  $i$ -ій точці РЗ ПР.

Візуалізація наведених в 3-му блоці даних включає в себе множини  $i_k$  координат точок позиціонування СхПР при багаторазовому його переміщенні в  $i$ -ту точку РЗ ПР, що наводиться в 4-му блоці (рис. 13.9) у вигляді тримірному графіку, де чорним кольором зображена  $i$ -та точка РЗ, що задана системою керування ПР, а червоним – точки, що є складовими множини  $i_k$ . Вказані множини точок зв'язані з СК ПР.

Експорт отриманих результатів моделювання у зовнішнє програмне забезпечення та їх збереження виконується натисканням на кнопку “Зберегти” (рис. 12.10), в 3-му блоці. В результаті відкривається діалогове вікно “Save As”, де користувачу надана можливість задати ім'я файлу з розширенням \*.xls, причому тип файлу встановлюється автоматично. Збереження файлу відбувається за замовчуванням у батьківському каталозі (наприклад, C:\Documents and Settings\User\Мои документы\IRWSAES).

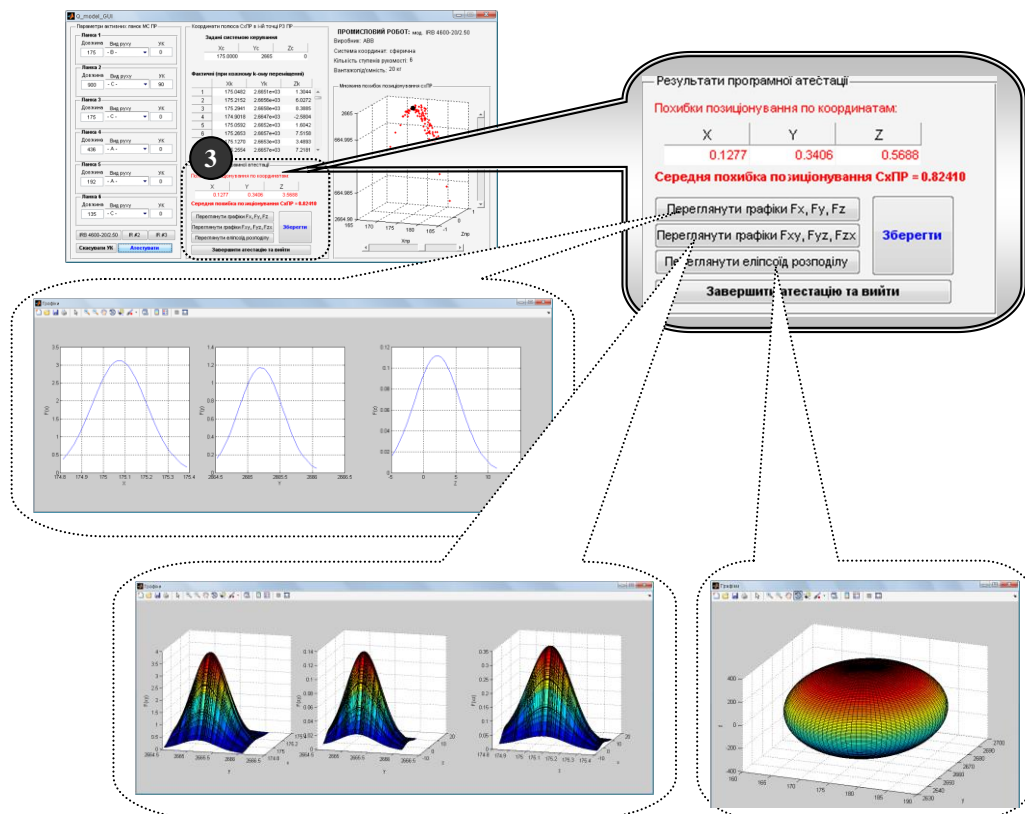


Рис. 12.8. Виведення результатів моделювання точності позиціонування в  $i$ -ій точці РЗ ПР

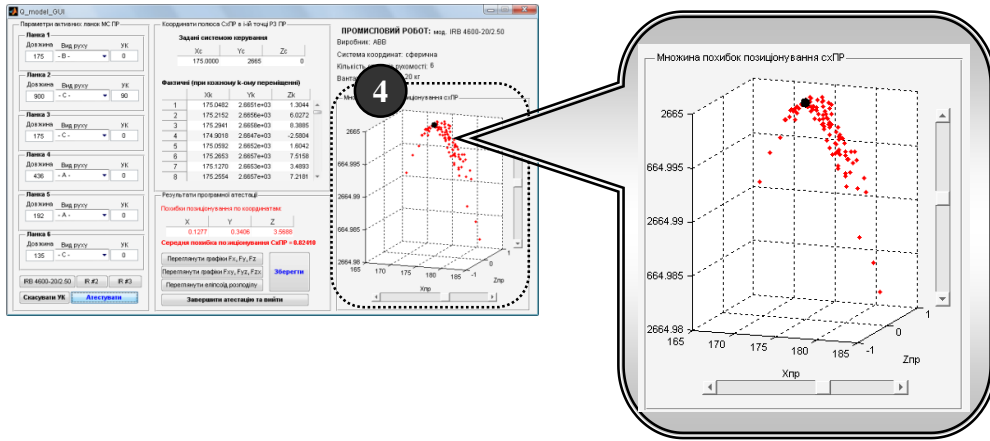


Рис. 12.9. Візуалізація результатів моделювання: множини  $i_k$  координат точок позиціонування СхПР при багаторазовому його переміщенні в  $i$ -ту точку РЗ

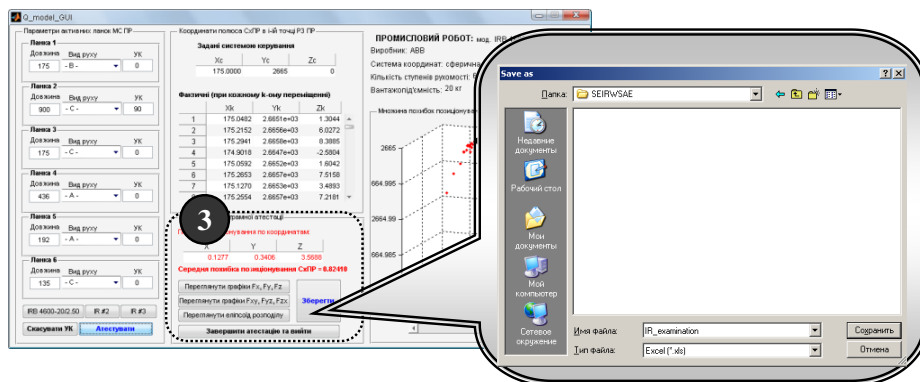


Рис. 12.10. Експорт та збереження результатів моделювання точності позиціонування СхПР

Очевидно, що умовою розміщення ТО в межах РЗ ПР є залежність:

$$\Delta_{\text{мод } i} \leq \Delta_{\text{ТО}i}.$$

Результати моделювання представляються у вигляді табл. 13.1.

Таблиця 12.1

Результати моделювання точності позиціонування ПР

№ з/п	Величини УК	Координати $i$ -ої точки РЗ ПР, $(X_i^{PP}, Y_i^{PP}, Z_i^{PP})$	Величина похибки позиціонування, $\Delta_{\text{ПР}i}$ , мм

Результати роботи програмного забезпечення IRWSAES дають можливість визначити доцільність використання обраного ПР за параметрами точності позиціонування СхПР, враховувати користувачу рекомендації щодо методів та засобів зменшення похибок позиціонування СхПР та в разі потреби коригувати розміщення ТО в РЗ ПР.

## 12.5. Контрольні запитання



### Теоретичні питання

1. Визначення точності позиціонування ПР.
2. Складові точності позиціонування.
3. Сутність позиційної повторюваності.
4. Фактори, що впливають на точнісні характеристики ПР.