

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ
ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ
В ГНУЧКИХ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМАХ
МЕТАЛООБРОБКИ**

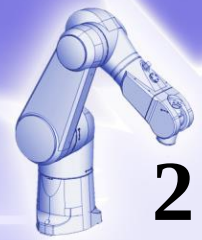
**КИРИЛОВИЧ
Валерій Анатолійович**

**доктор технічних наук,
професор каф. РЕА
Ім. проф. Б.Б. Самотокіна**



**Житомир
2025 р.**

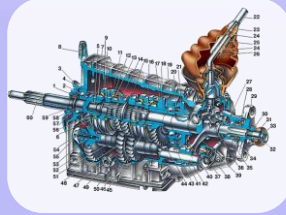
Постановка та актуальність проблеми



Двигун



Коробка швидкостей



Трансмісія

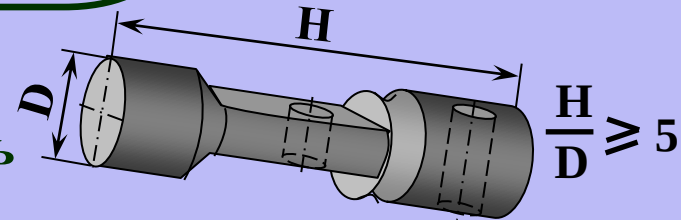


+

+



**> 200 шт довгомірних
деталей на один автомобіль**

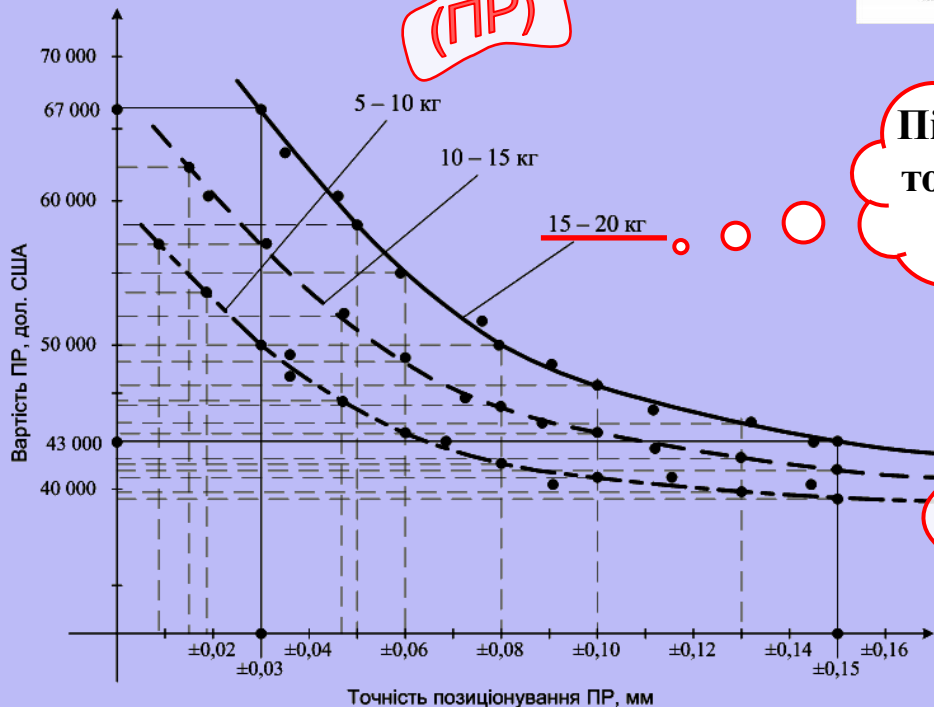
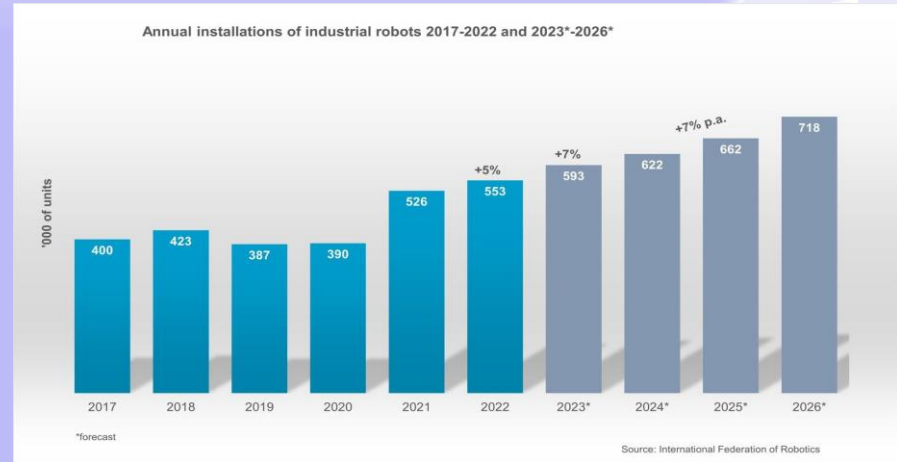
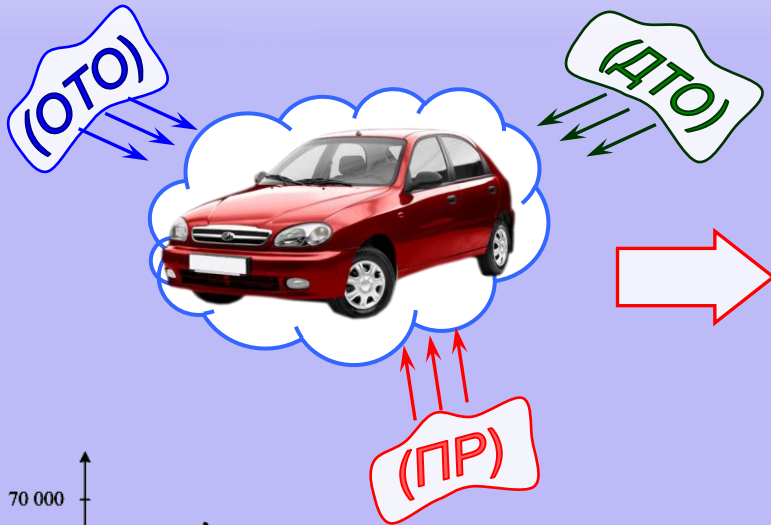
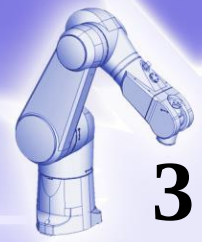


Виробництво автомобілів у світі за даними Міжнародної організації виробників автомобілів (*International Organization of Motor Vehicle Manufacturers*)

- **Впродовж 2023 року** глобальне виробництво автотранспорту склало 93 546 599 од. Це на 10% більше, ніж в 2022 р. Відносно доковідного 2019 р. глобальне автовиробництво збільшилось на 2%.
- **Найбільша частка** з цієї кількості належить *легковим авто*, яких було виготовлено 68 020 265 од. (+11% до 2022р.). Легких комерційних автомобілів виготовлено - 21 441 715 од. (+9%). Великих вантажних авто - 3 774 394 од. (+14%). Автобусів - 310 225 од. (+22%).
- **Найбільшим автовиробником** у світі залишається Китай, де за рік було виготовлено понад 30,1 млн од. автотранспорту, що на 12% більше, ніж за 2022р. Друге місце посідає США, з результатом - 10,6 млн. од. (+6%). Третій результат продемонструвала Японія - майже 9 млн. од. (+15%). Також у першу п'ятірку потрапили: Індія - 5,8 млн од. (+7%) та Півд. Корея - 4,2 млн од. (+13%).

Стан світового ринку ПР

за даними щорічного періодичного видання
міжнародної федерації робототехніки (IFR) World Robotics 2024



Підвищення
точності ПР

в 5 раз
 $[0,15; 0,03]$

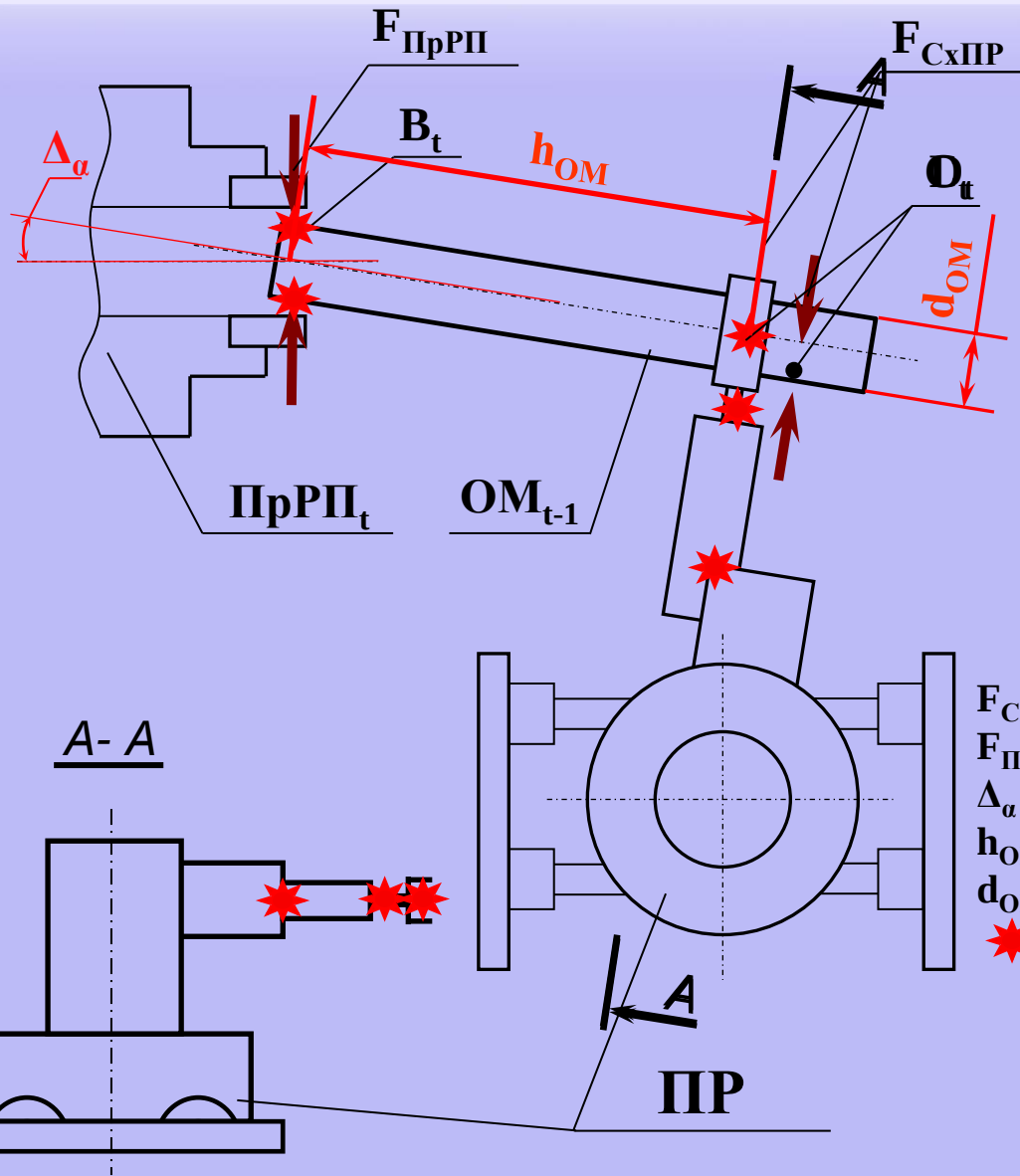
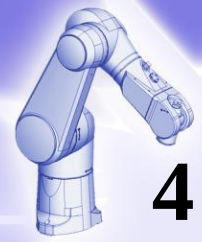
Збільшення
вартості ПР
на $\approx \$24\,000$

$[\$67\,000 - 43\,000]$

ПР з **низькою** точністю
та **відносно** малою вартістю

ПР з **високою** точністю
та **відносно** великою вартістю

Сутність явища ФС (Force Conflict – конфлікт сил)



Умови виникнення явища ФС

- $F_{\text{ПрРП}} \gg F_{\text{СхПР}}$;
- $h_{\text{ОМ}} \gg d_{\text{ОМ}}$;
- $\Delta\alpha$ - похибка встановлення ОМ_{t-1} в ПрРП_t

$F_{\text{СхПР}}$ – сила затиску ОМ_{t-1} в пристосуванні РП_t ;
 $F_{\text{ПрРП}}$ – сила затиску ОМ_{t-1} в пристосуванні РП_t ;
 $\Delta\alpha$ – похибка встановлення ОМ_{t-1} в ПрРП_t ;
 $h_{\text{ОМ}}$ – осьовий розмір ОМ_{t-1} ;
 $d_{\text{ОМ}}$ – діаметральний розмір ОМ_{t-1} ;
 ★ – зони найбільш вірогідних ушкоджень та поломок МС

Наслідки негативного впливу явища FC на елементи ТРС



Показники працездатності та функціональної надійності складових ТРС:

- поломки СхПР;
- поломки елементів МС ПР;
- діагностування, пошук, виготовлення
заміна непрацездатного оснащення

Втрати часу на:

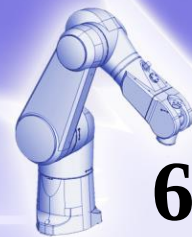
- механічне та/або програмне
корегування положення СхПР;
- технічне обслуговування і ремонт
МС ПР;
- заміну оснащення ОТО

FC

Технологічні показники якості оброблених на МРВ поверхонь:

- збільшення сумарних похибок обробки поверхонь;
- збільшення величини відхилень форми та взаємного розташування
оброблених поверхонь

Мета роботи



Підвищення якості⁽¹⁾ та зменшення трудомісткості проєктування складних розподілених у просторі організаційно-технічних об'єктів і комплексів ГКІС, зокрема ГВК як складової останніх, шляхом розробки та застосування інформаційного, методичного, алгоритмічного, програмного забезпечення автоматизації процесу керування точністю ПР, а також програмно-апаратних засобів комбінованої адаптації СхПР.

⁽¹⁾Підвищення якості – складова частина управління якістю⁽²⁾, зосереджена на збільшенні здатності виконати вимоги щодо якості.

⁽²⁾Управління якістю – скоординовані дії щодо спрямовування та контролювання діяльності організації стосовно якості⁽³⁾

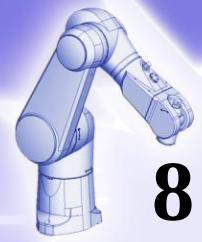
⁽³⁾Якість (quality) – ступінь, до якого сукупність власних характеристик (характерних особливостей) задовольняє вимоги, тобто сформульовані потреба чи очікування, загальнозрозумілі чи обов'язкові.

Для досягнення вказаної мети необхідно розв'язати наступні завдання:



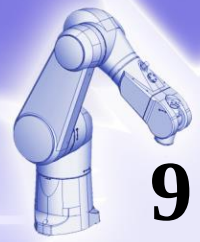
1. Провести аналіз точнісних характеристик ПР, існуючих методів та засобів їх визначення та моделювання; визначити негативний вплив явища конфлікту сил при технологічному обслуговуванні промисловими ротами ПрРП.
2. Визначити залежність величини похибки позиціонування Сх від конфігураційного стану ланок маніпуляційної системи ПР та вектору підходу в будь-яку наперед задану, як правило задану програмно, точку робочої зони ПР.
3. Розробити точісну кватерніонну модель маніпуляційної системи ПР, дослідити її працездатність.
4. Розробити методику програмної атестації робочих зон ПР та алгоритмічне і програмне забезпечення їх реалізації.
5. Розробити рекомендації щодо можливих методів зменшення похибок позиціонування СхПР при технологічному обслуговуванні ПР робочих позицій ГВК.
6. Розробити методику проектування вузлів адаптації СхПР до негативних силомоментних збурень в умовах конфлікту сил.
7. Провести апробацію виконаних розробок.

Наукова новизна одержаних результатів:



- *вперше* запропоновано використання Q-моделей точності позиціонування ПР, що базується на застосуванні математичного апарату кватерніонів для опису точнісних характеристик МС ПР і дозволяє реалізувати єдиний системний підхід при аналізі кінематичних структур МС ПР та знизити операційно-обчислювальне навантаження при проведенні моделювання їх точнісних характеристик;
- *набув подальшого розвитку* формалізований опис точнісних характеристик МС ПР для опису величин похибок в зчленуваннях активних ланок МС ПР та їх взаємозв'язок, що базується на використанні математичного апарату кватерніонів та відтворює особливості процесу багаторазового позиціонування СхПР в попередньо заданій системою керування точці РЗ ПР шляхом використання кватерніонних точнісних моделей ланок МС ПР;
- *дістав подальшого розвитку* підхід до атестації РЗ ПР для проведення точнісного аналізу його РЗ та визначення оптимальних за критерієм найменшої похибки позиціонування векторів підходу до заданої системою керування точки РЗ на основі комп'ютерного моделювання точнісних характеристик МС ПР з використанням методів теорії імовірності та статистичного аналізу, що дозволяє знизити додаткові фінансові затрати на придбання та подальше обслуговування експериментально-вимірювального обладнання.

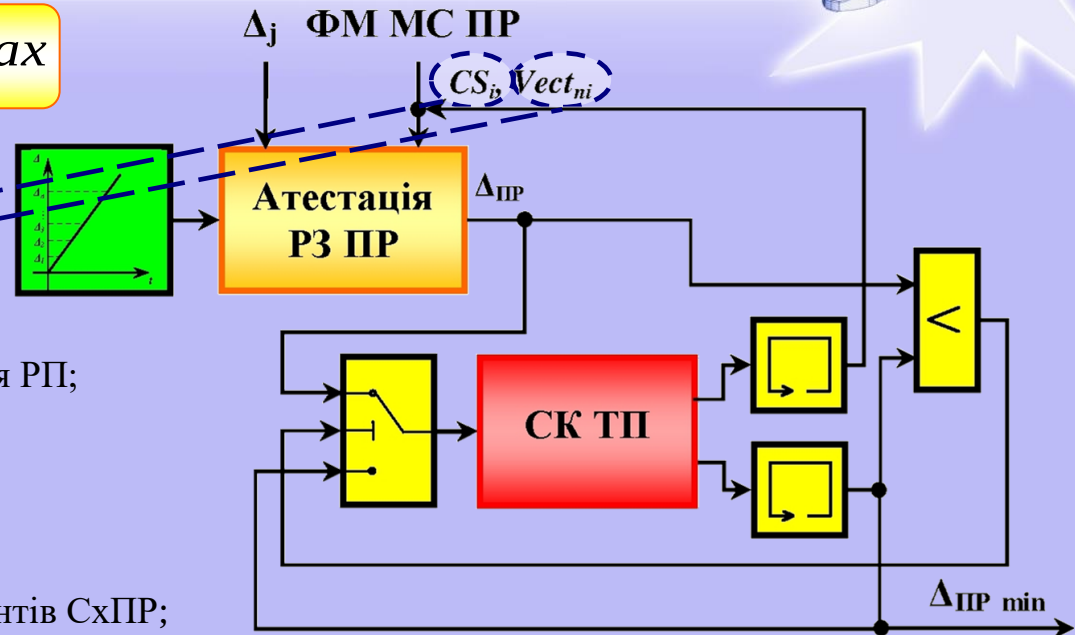
Постановка задачі



$$TSA = f(AP_{PP}, \Delta_{закр}, \Delta_{баз}, \Delta_{3E}) \rightarrow \max$$

$$AP_{PP} = f(\Delta_{PP}) \rightarrow \max |_{\Delta_{PP} \rightarrow \min}$$

$$\Delta_{PP} = f(\Delta_j, CS_i, Vect_{ni}) \rightarrow \min$$



де TSA – точність технологічного обслуговування РП;

AP_{PP} – точність позиціонування ПР;

$\Delta_{баз}$ – похибка базування ОМ в СхПР;

$\Delta_{закр}$ – похибка закріплення ОМ в СхПР;

Δ_j – похибки в зчленуваннях ланок МС ПР;

Δ_{3E} – похибки виготовлення затискних елементів СхПР;

CS_i – конфігураційних стан ланок МС ПР, що забезпечує позиціонування СхПР в i -ій точці РЗ ПР;

$Vect_{n_i}$ – n_i -ий вектор підходу СхПР в i -ту точку РЗ ПР

$$СК\ ТП \rightarrow [(TEM \vee IRM) \vee (CS_{var} \vee Vect_{var}) \vee (BA\ СхПР)]$$

тут СК ТП – система керування (СК) точністю позиціонування (ТП) ПР;

TEM – зміна положення технологічного обладнання в межах РЗ ПР;

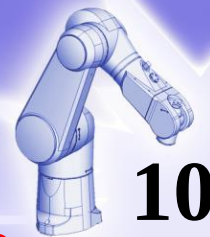
IRM – зміна положення ПР в межах РЗ технологічного обладнання;

CS_{var} – зміна конфігураційного стану ланок МС ПР, що забезпечує позиціонування СхПР в i -ій точці РЗ ПР;

$Vect_{var}$ – зміна вектору підходу СхПР в i -ту точку РЗ ПР;

BA СхПР – використання додаткових апаратно-програмних засобів адаптації СхПР, наприклад вузлів адаптації (BA) СхПР;

Місце та структура задачі керування точністю позиціонування ПР при проєктуванні ГКІС



10

ОСНОВНІ ЗАДАЧІ ПРОЄКТУВАННЯ ГКІС

Технологічне проєктування ГКІС

Проєктування СУ ГКІС

Проєктування систем АСНД, САПР, АСТПВ

ЗАДАЧІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Технологічний аналіз виробництва

Впровадження у виробництво розробленого роботизованого ТП, оснащення та обладнання

Розробка ТП; Проєктування ГВС, ГВК

Вибір структурно-компонувальної схеми ГВС

Розробка календарних планів, проведення технологічних та організаційних заходів для реалізації ТП

Проєктування та виготовлення автоматизованого технологічного оснащення

Придбання матеріалів та комплектуючих виробів

Вибір ОТО

Вибір ДТО

Вибір ПР

АС РМСТ

Розробка маршрутної технології

АС компонентів ГВС

Розв'язування траєкторних задач

РЕЗУЛЬТАТ

РЕЗУЛЬТАТ

РЕЗУЛЬТАТ

Керування точністю позиціонування СхПР

СКЛАД ТА СТРУКТУРА ЗАДАЧІ

Аналіз паспортних характеристик ПР

Аналіз точнісних характеристик ПР

Точісна програмна атестація РЗ ПР

Аналіз кінематичної структури МС ПР

Аналіз складових похибок позиціонування ПР

Визначення точності позиціонування при зміні УК в зчленуваннях ланок МС ПР

Формалізація МС ПР

Розробка точнісної моделі МС ПР

Моделювання точності позиціонування ПР

При зміні вектору підходу СхПР

При зміні орієнтації СхПР

Визначення обмежень реалізації векторів та траєкторій підходу СхПР

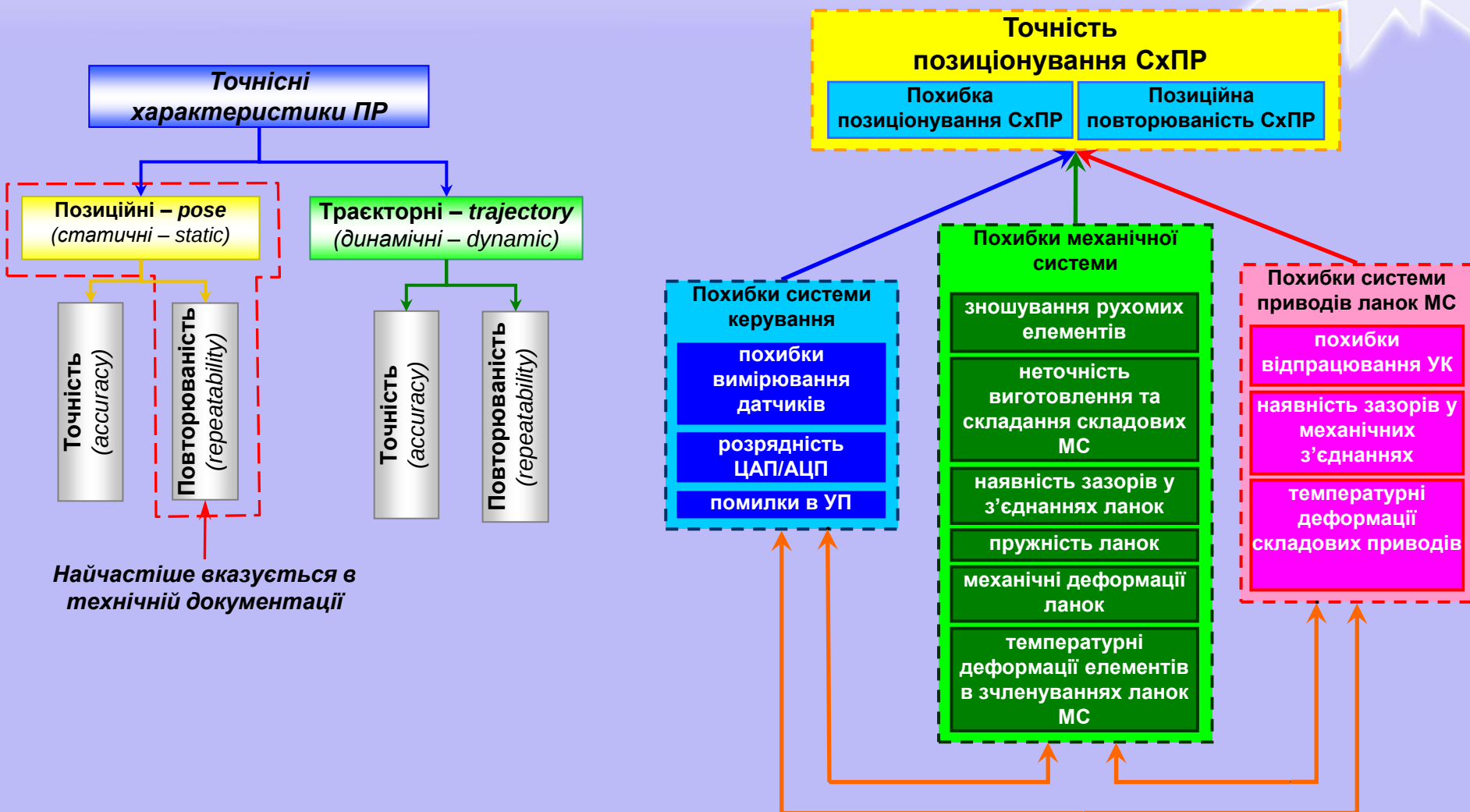
Рекомендації щодо застосування методів та засобів адаптації СхПР

Аналіз, систематизація та групування множини обмежень з боку ТО

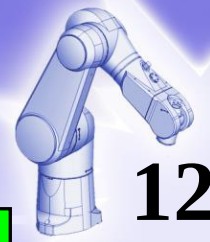
Аналіз, систематизація та групування множини обмежень з боку ПР

Використання відомих засобів адаптації, наприклад, очутливого кистьового суглобу маніпулятора ПР (патент України на корисну модель № 58988)

Точнісні характеристики ПР та узагальнена схема формування точності



Складові точності встановлення OM_{t-1} в $ПрРП_t$



12

Детермінована складова

- неточність виготовлення ланок МС ПР;
- конструктивні особливості робочої зони ПР визначені СК ПР;
- особливості просторового розміщення ланок (конфігураційний простір) в кожній опорній точці позиціонування Сх;
- маса $OM_{t-1/t}$;
- зазори в з'єднаннях ланок МС;
- похибки зношування упорів.

Стохастична складова

- пружні відхилення МС ПР;
- зношування елементів МС;
- інерційні складові приводів ланок МС ПР;
- неточності датчиків ЗЗ;
- накопичена похибка інтегральних датчиків позиціонування;
- похибки налагодження упорів МС за координатами руху;
- ковзання в системі електроприводу;
- характеристики затискних елементів СхПР:
 - похибки виготовлення;
 - похибки складання

Похибка позиціонування СхПР

Точність роботизованного встановлення $OM_{t-1/t}$ в $ПрРП_t$

Схема базування
 $OM_{t-1/t}$ в $ПрРП_t$

Похибка базування
 $OM_{t-1/t}$ в $ПрРП_t$

Похибка закріплення
ТРК (СхПР+ $OM_{t-1/t}$)
в $ПрРП_t$

Похибки затискних
елементів $ПрРП_t$

Похибка встановлення ТРК
(СхПР+ $OM_{t-1/t}$) в $ПрРП_t$

Похибка встановлення
 $OM_{t-1/t}$ в СхПР

Схема базування
 $OM_{t-1/t}$ в СхПР

Похибка базування
 $OM_{t-1/t}$ в СхПР

Похибка закріплення
 $OM_{t-1/t}$ в СхПР

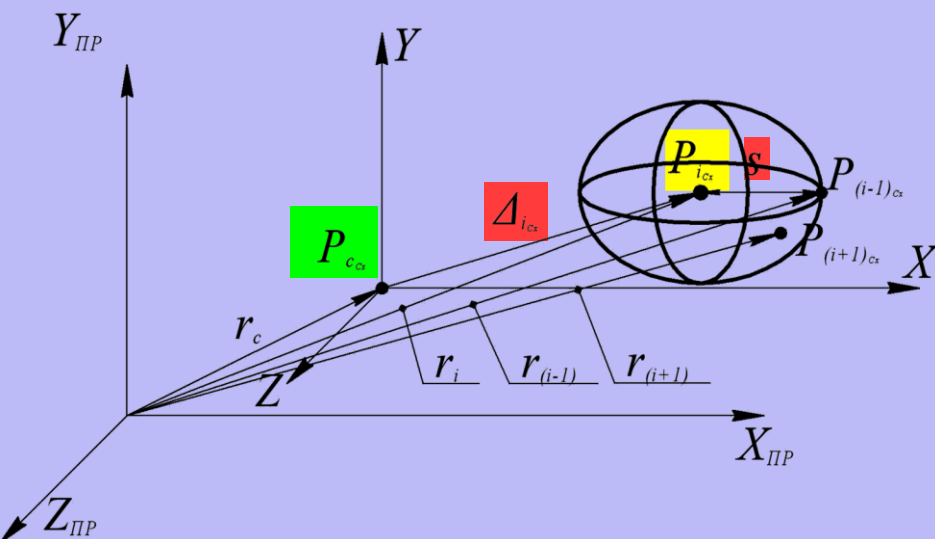
Похибки затискних
елементів СхПР

Геометричні розміри, типи та показники
якості поверхонь $OM_{t-1/t}$

Графічне представлення сутності похибки позиціонування та позиційної повторюваності

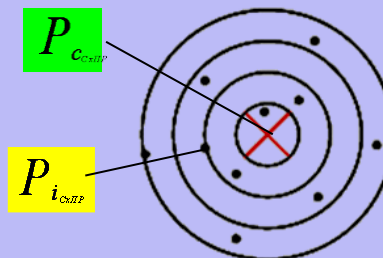


13

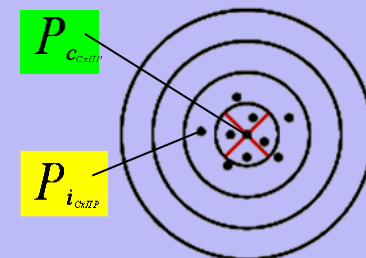


Тут: $P_{c_{схПР}}$ - задане системою керування положення
полюса СхПР;
 $P_{i_{схПР}}$ - положення полюса СхПР при i -му переміщенні;
 $\Delta_{i_{схПР}}$ - похибка позиціонування СхПР;
 S - позиційна повторюваність

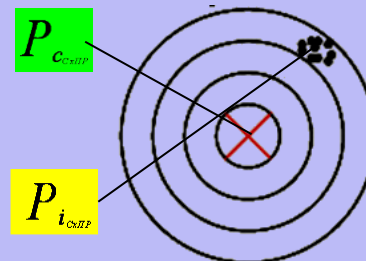
Погані
повторюваність
та точність



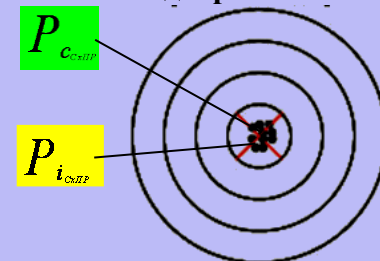
Погана
повторюваність
та добра точність



Добра
повторюваність
та погана точність



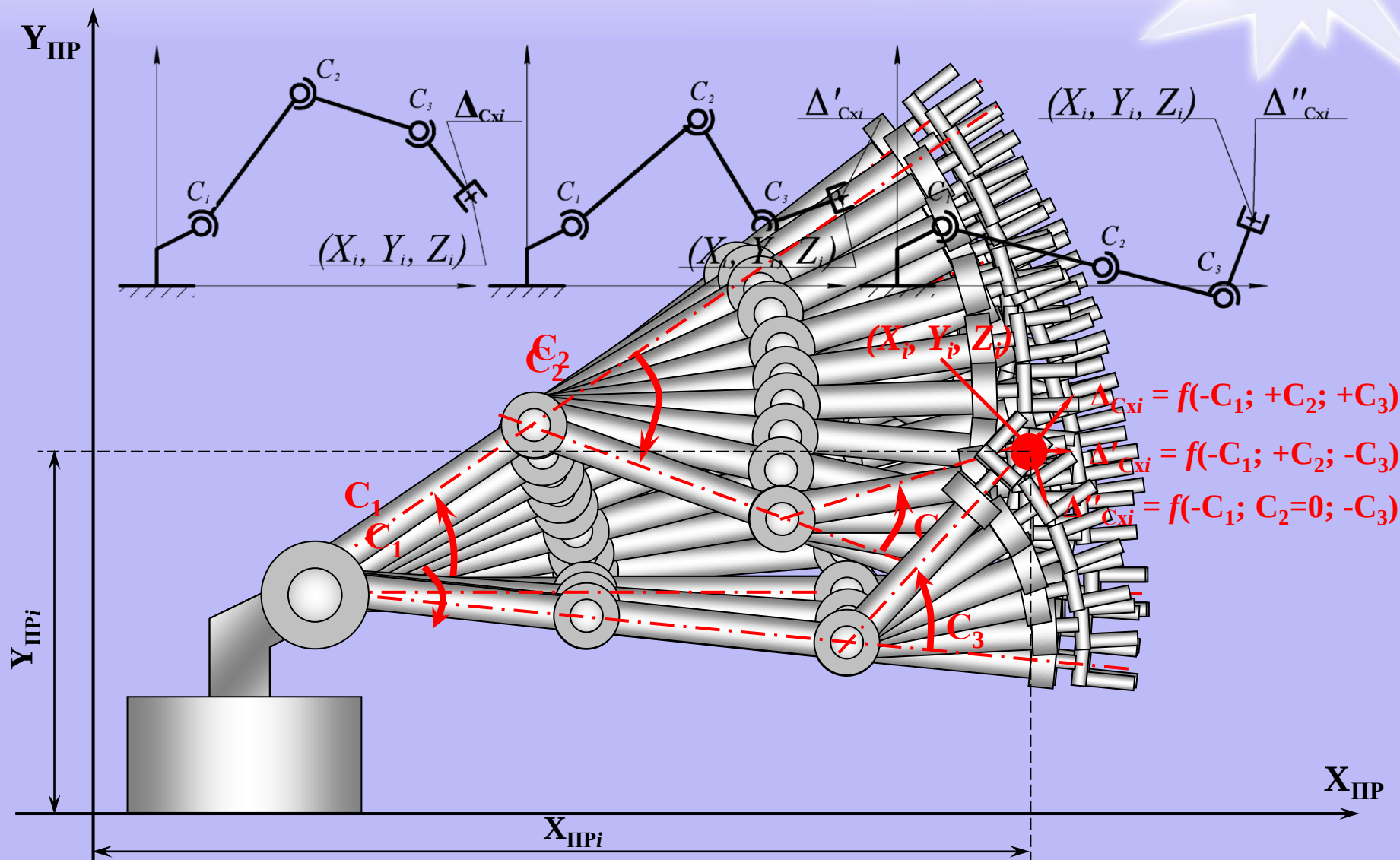
Добра
повторюваність
та добра точність



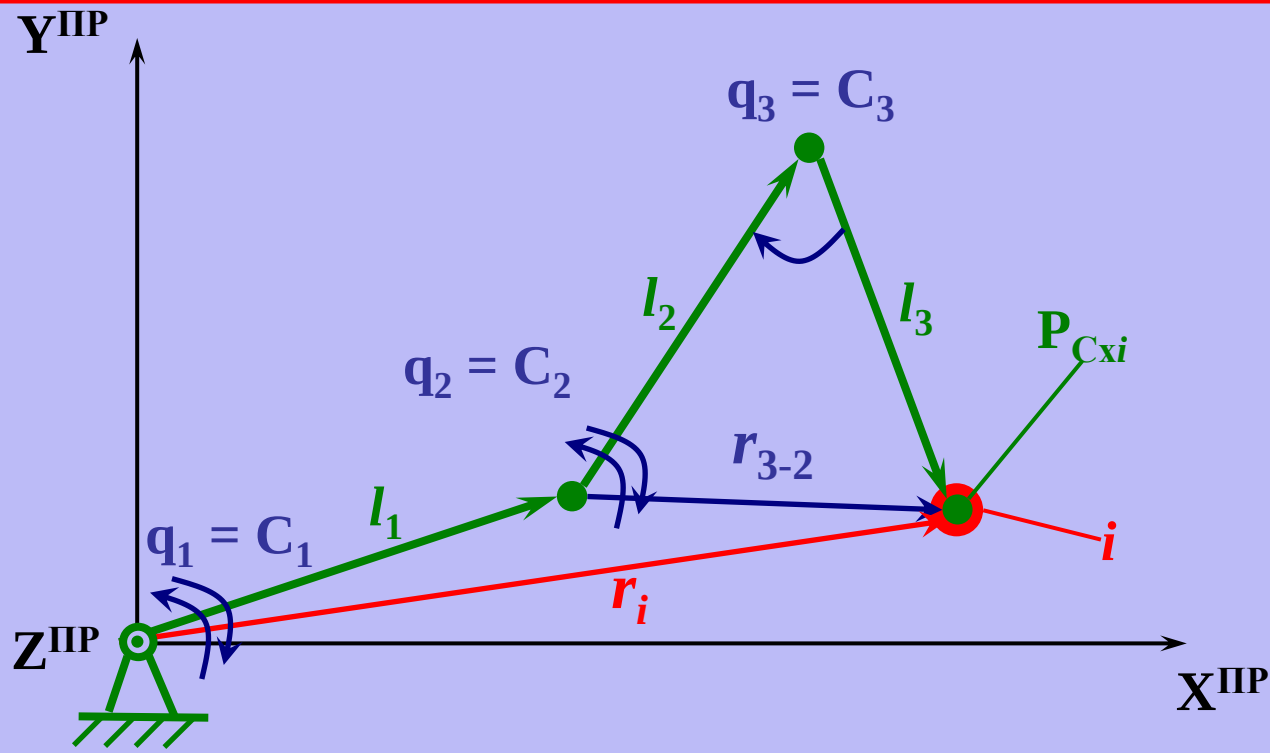
Зміна конфігураційного стану ланок МС ПР при виході в задану системою керування точку $P_i (X_{iПР}, Y_{iПР}, Z_{iПР})$



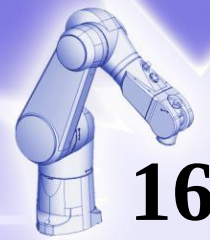
14



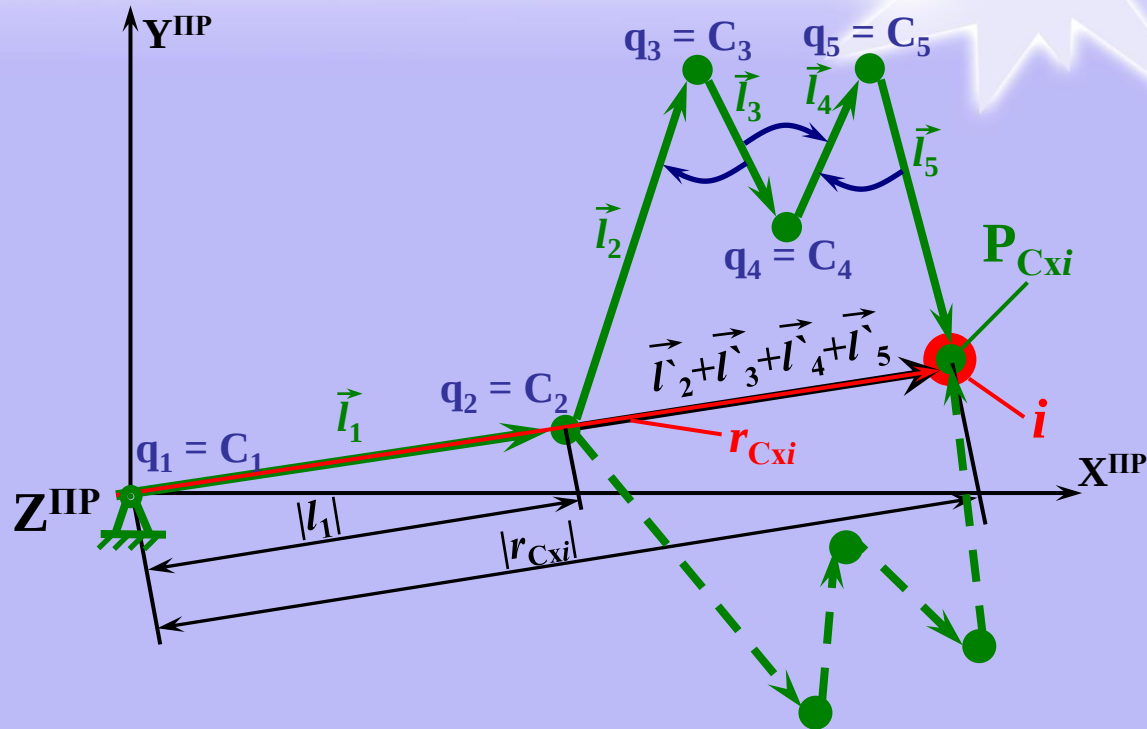
15

$$((\angle l_1 r_{C_{x_i}} \rightarrow \min) \wedge (r_{3-2} \rightarrow \min) \leftrightarrow ((C_3 = \angle l_2 l_3) \rightarrow \min)) \Rightarrow (\Delta_{C_{x_i}} \rightarrow \min)$$


Розвиток відомого твердження /за слайдом №15/

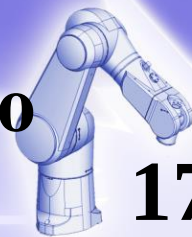


Для n -ланкових МС ПР оптимальним за точністю позиціонування ($\Delta_{Cxi} \rightarrow \min$) СхПР конфігураційний стан буде тоді, коли перша ланка l_1 буде співпадати з радіус-вектором r_{Cxi} , що задає положення i -ої точки РЗ в системі координат ПР, а векторна сума довжин всіх наступних ланок $l_2, l_3, \dots, l_n$ МС ПР буде різницею довжин радіус-вектора r_{Cxi} та першої ланки, причому, утворюючи якомога менші кути C між суміжними ланками.



$$(l_1 \in r_{Cxi}) \wedge ((\angle l_2, l_3 \rightarrow \min) \wedge (\angle l_3, l_4 \rightarrow \min) \wedge \dots \wedge (\angle l_{n-1}, l_n \rightarrow \min)) \wedge (r_{Cxi} - l_1 = (\bar{l}_2 + \bar{l}_3 + \bar{l}_4 + \dots + \bar{l}_n)) \Rightarrow \Delta_{Cxi} \rightarrow \min$$

Пропонована гіпотеза про взаємне накладання та/або компенсацію похибок в зчленуваннях ланок ПР

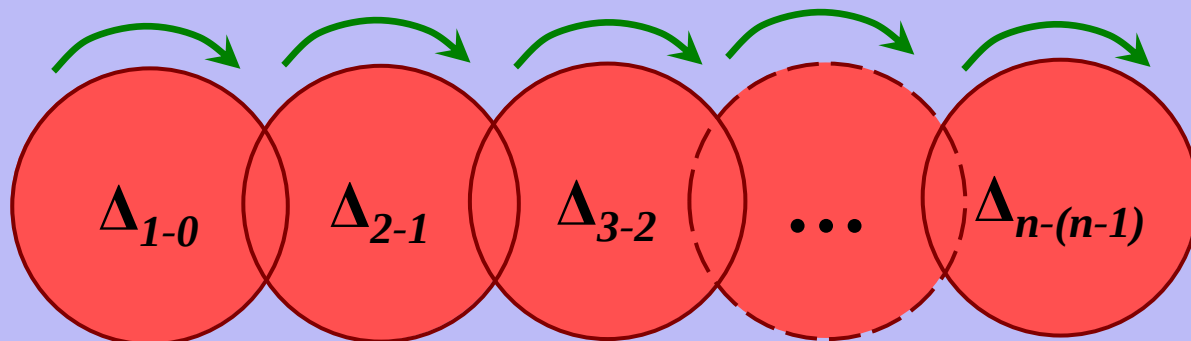


17

Гіпотеза:

При упорядкованому однонаправленому переміщенні суміжних ланок МС ПР відбувається взаємне накладання величин похибок в зчленуваннях, що призводить до збільшення похибки позиціонування Sx в i -ій точці РЗ ПР:

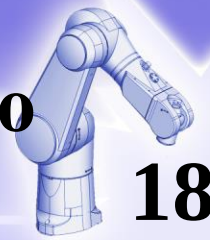
♦ графічна інтерпретація:



♦ формалізований вираз:

$$\begin{aligned} & \left(\bigvee_A \langle +q_1 \wedge +q_2 \wedge \dots \wedge smq_n \wedge sm_{n-1}q_{n+1} \rangle \right) \bigvee \left(\bigvee_B \langle +q_1 \wedge +q_2 \wedge \dots \wedge smq_n \wedge sm_{n-1}q_{n+1} \rangle \right) \bigvee \\ & \bigvee_C \left(\bigvee \langle +q_1 \wedge +q_2 \wedge \dots \wedge smq_n \wedge sm_{n-1}q_{n+1} \rangle \right) \Rightarrow_u \Delta_{Cx_i} = \Delta_{1-0} \cup \Delta_{2-1} \cup \Delta_{3-2} \cup \Delta_{n-(n-1)} \Rightarrow \\ & \Rightarrow_u \Delta_{Cx_i} \leftrightarrow \Delta_{Cx_i} \rightarrow max \end{aligned}$$

Пропонована гіпотеза про взаємне накладання та/або компенсацію похибок в зчленуваннях ланок ПР

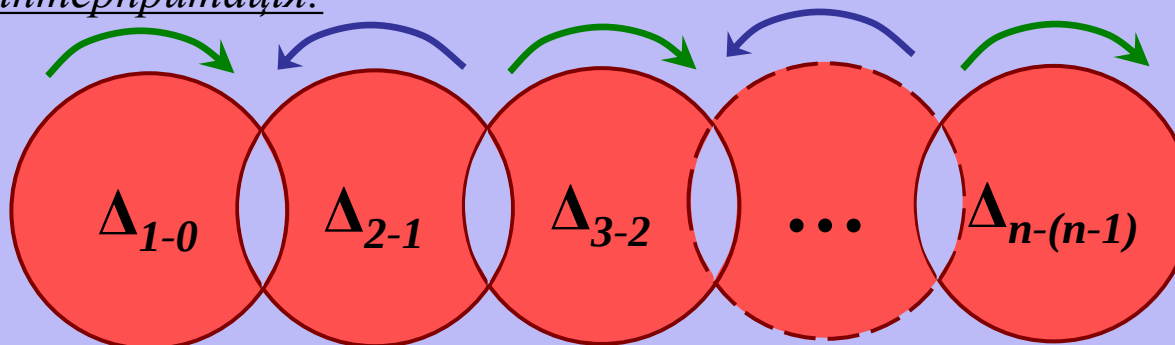


18

Гіпотеза (продовження):

в протилежному випадку при упорядкованому різнонаправленому переміщенні суміжних ланок відбувається взаємна компенсація похибок в зчленуваннях, що в свою чергу відповідно призводить до зменшення загальної похибки позиціонування Δ_{Cxi} в i -й точці РЗ ПР.

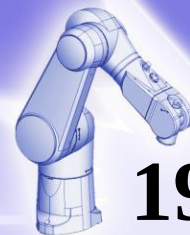
♦ графічна інтерпретація:



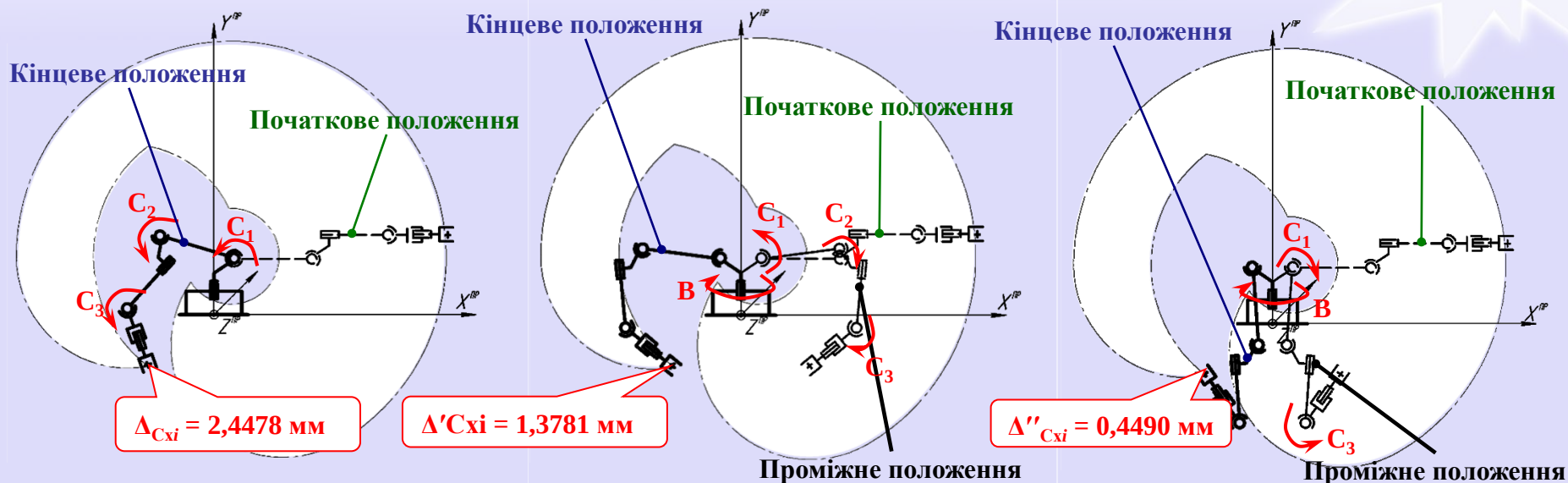
♦ формалізований вираз:

$$\begin{aligned}
 & \left(\bigvee_A \langle +q_1 \wedge -q_2 \wedge \dots \wedge smq_n \wedge \overline{sm}_{n-1}q_{n+1} \rangle \right) \bigvee \left(\bigvee_B \langle +q_1 \wedge -q_2 \wedge \dots \wedge smq_n \wedge \overline{sm}_{n-1}q_{n+1} \rangle \right) \bigvee \\
 & \quad \bigvee \left(\bigvee_C \langle +q_1 \wedge -q_2 \wedge \dots \wedge smq_n \wedge \overline{sm}_{n-1}q_{n+1} \rangle \right) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow_m \Delta_{Cxi} = \left(\left(\left(\left(\Delta_{1-0} / \Delta_{2-1} \right) \cup \left(\Delta_{2-1} / \Delta_{1-0} \right) \right) / \Delta_{3-2} \right) \cup \left(\Delta_{3-2} / \left(\left(\Delta_{1-0} / \Delta_{2-1} \right) \cup \left(\Delta_{2-1} / \Delta_{1-0} \right) \right) \right) / \Delta_{n-(n-1)} \right) \cup \\
 & \quad \cup \left(\Delta_{n-(n-1)} / \left(\left(\left(\Delta_{1-0} / \Delta_{2-1} \right) \cup \left(\Delta_{2-1} / \Delta_{1-0} \right) \right) / \Delta_{3-2} \right) \cup \left(\Delta_{3-2} / \left(\left(\Delta_{1-0} / \Delta_{2-1} \right) \cup \left(\Delta_{2-1} / \Delta_{1-0} \right) \right) \right) \right) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow_m \Delta_{Cxi} \leftrightarrow \Delta_{Cxi} \rightarrow \min
 \end{aligned}$$

Результат моделювання точності позиціонування ПР мод. IRB 4600-20/2.50 (перевірка гіпотези)



19



$$i = (X_i^{PP} = -775; Y_i^{PP} = -745; Z_i^{PP} = 108)$$

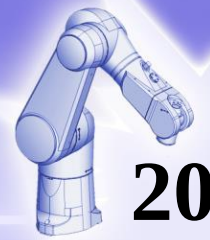
При переміщенні Сх ПР із початкового в кінцеве положення відпрацьовані наступні узагальнені координати:

$$\left. \begin{array}{l} B = 0^\circ \\ C_1 = -150^\circ \\ C_2 = -75^\circ \\ A_1 = 0^\circ \\ C_3 = -60^\circ \\ A_2 = 0^\circ \end{array} \right\} (\Delta_{PP} = 1,6) < (\Delta_{cx} = 2,45)$$

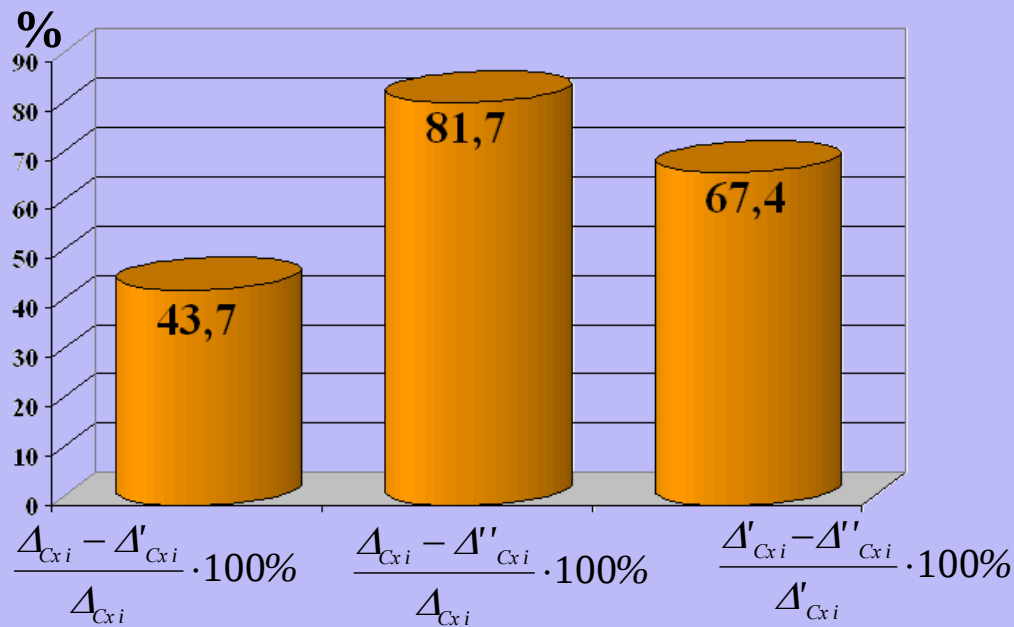
$$\left. \begin{array}{l} B = -180^\circ \\ C_1 = -24^\circ \\ C_2 = 70^\circ \\ A_1 = 0^\circ \\ C_3 = 60^\circ \\ A_2 = 0^\circ \end{array} \right\} (\Delta_{PP} = 1,6) > (\Delta_{cx} = 1,36)$$

$$\left. \begin{array}{l} B = -180^\circ \\ C_1 = 90^\circ \\ C_2 = 0^\circ \\ A_1 = 0^\circ \\ C_3 = -120^\circ \\ A_2 = 0^\circ \end{array} \right\} (\Delta_{PP} = 1,6) > (\Delta_{cx} = 0,45)$$

Результат моделювання точності позиціонування ПР мод. IRB 4600-20/2.50 (перевірка гіпотези)



Зміна величини похибки позиціонування СхПР
при зміні конфігураційного стану ланок МС в i -ій точці РЗ ПР, %



Абсолютні значення
похибки позиціонування
СхПР в i -ій точці РЗ
/слайд 19/

$$\Delta_{Cxi} = 2,4478 \text{ мм}$$

$$\Delta'_{Cxi} = 1,3781 \text{ мм}$$

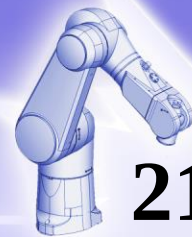
$$\Delta''_{Cxi} = 0,4490 \text{ мм}$$

$$\frac{2,4478 - 1,3781}{2,4478} \cdot 100\% = 43,7\%$$

$$\frac{2,4478 - 0,4490}{2,4478} \cdot 100\% = 81,7\%$$

$$\frac{1,3781 - 0,4490}{1,3781} \cdot 100\% = 67,4\%$$

Узагальнений вираз вектору підходу



Вектор підходу (*Vect*) СхПР від початкової ($i-1$)-ої точки в i -ту точку РЗ ПР при технологічному обслуговуванні ПР ПрРП_т є складним узагальненим поняттям і його напрям залежить від множини факторів, що в конкретний момент часу та певних умовах впливають на його (вектора) формування.

$$Vect_{n_i} = f(MCh_{n_i}, Tr_{n_i}, Q_{n_i}, PrSp_{n_i}, Rf_{n_i}),$$

де MCh_{n_i} – множина вказаних характеристик руху (**Movements' Characteristics**) МС ПР при переміщення СхПР в i -ту точку РЗ ПР (швидкості та прискорення ланок МС ПР);

Tr_{n_i} – множина траєкторій (**Trajectories**), що забезпечують переміщення СхПР в i -ту точку РЗ ПР;

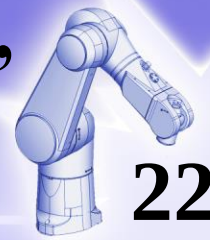
Q_{n_i} – множина узагальнених координат в зчленуваннях ланок МС ПР;

$PrSp_{n_i}$ – множина геометрично-технологічних обмежень, тобто зон заборони (**Prohibited Spaces**) з боку технологічного обладнання та технологічного оснащення, що розміщується в обладнанні;

Rf_{n_i} – конструктивні особливості (**Robot's features**) МС ПР.

Фактори, що визначають “вектор підходу”

СхПР в i -ту точку РЗ



Множина характеристик руху
(*Movements' Characteristics*)
МС ПР при переміщенні СхПР в i -ту точку РЗ ПР

$$\Rightarrow MCh_{n_i} = f(V_{n_i}, A_{n_i})$$

$$V_{n_i} = (v_{n_1}, v_{n_2}, \dots, v_{n_{s-1}}, v_{n_s})$$

$$A_{n_i} = (a_{n_1}, a_{n_2}, \dots, a_{n_{s-1}}, a_{n_s})$$

Швидкості та прискорення активних ланок, що забезпечують переміщення СхПР
в i -ту точку при відпрацюванні n -го вектору підходу

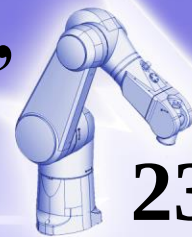
Множина траєкторій (*Trajectories*),
що забезпечують переміщення СхПР в i -ту точку РЗ ПР

$$\Rightarrow Tr_{n_i} = (tr_{n_1}, tr_{n_2}, \dots, tr_{n_{s-1}}, tr_{n_s})$$

Множина узагальнених координат
(*Generalized Coordinates*) в зчленуваннях ланок МС ПР,
що забезпечують переміщення СхПР в i -ту точку при
відпрацюванні n -го вектору підходу

$$\Rightarrow Q_{n_i} = (q_{n_1}, q_{n_2}, \dots, q_{n_{s-1}}, q_{n_s})$$

Фактори, що визначають “вектор підходу” СхПР в i -ту точку РЗ



23

Множина геометрично-технологічних обмежень

$$PrSp_{n_i} = (PrSp_{n_1}, PrSp_{n_2}, \dots, PrSp_{n_{(s-1)}}, PrSp_{n_s})$$

Зони заборони
(*Prohibited Spaces*)
з боку технологічного
обладнання

Технологічне оснащення,
що перешкоджає
безколізійному
переміщенню СхПР

Технологічне обладнання,
що утворює перепони на
шляху переміщення
СхПР

Конструктивні особливості МС ПР
(*Robot's features*)

$$Rf_{n_i} = ([(H,d) \wedge (l,a,b)]_1, [(H,d) \wedge (l,a,b)]_2, \dots, [(H,d) \wedge (l,a,b)]_{l-1}, [(H,d) \wedge (l,a,b)]_l)$$

l -та ланка



висота діаметр

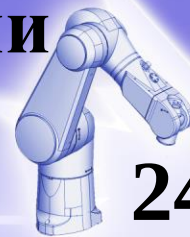
Циліндр

або

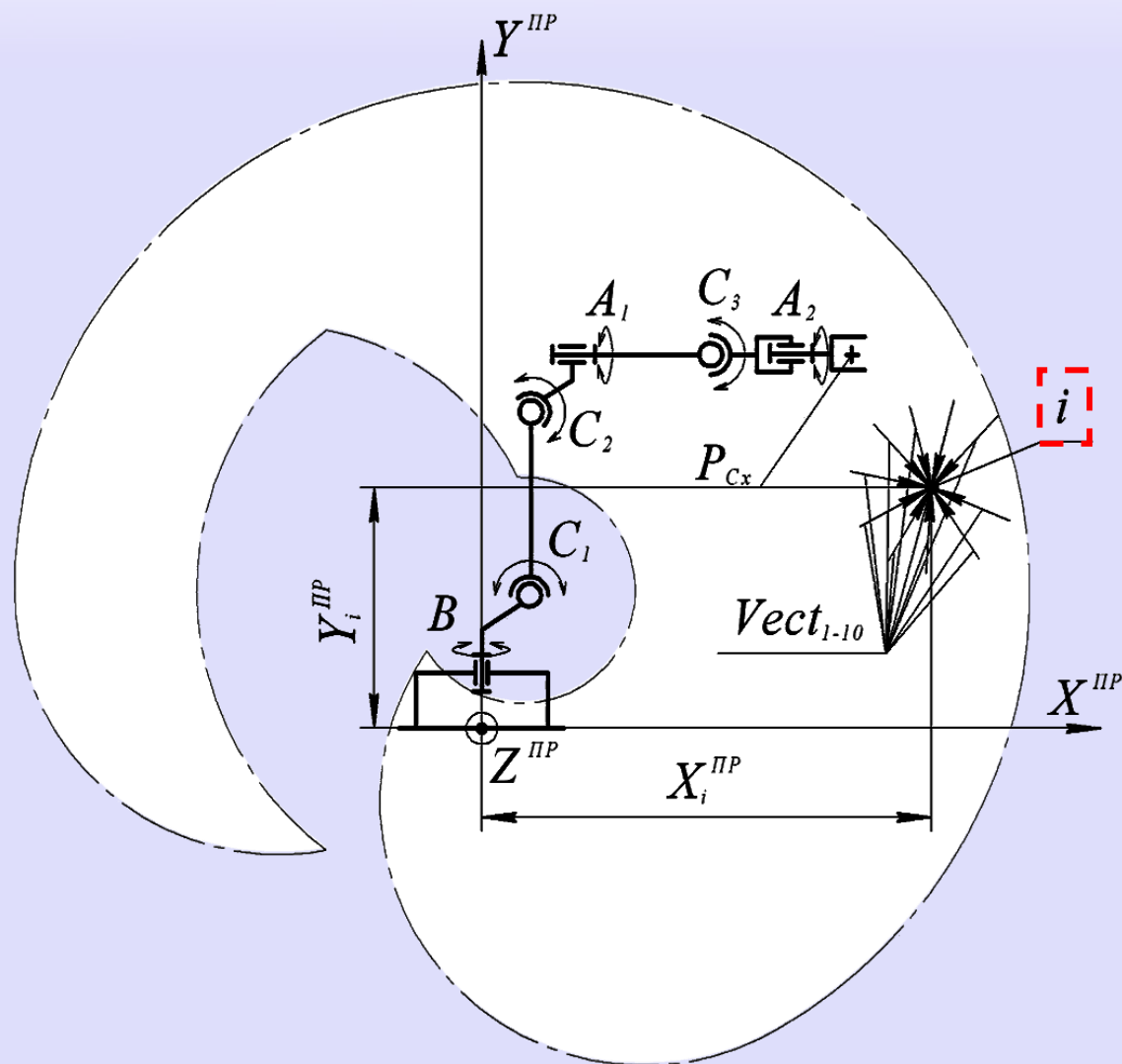
довжина товщина ширина

Паралелепіпед

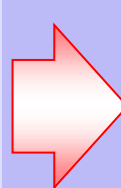
Графічне представлення реалізації множини векторів підходу в i -ту точку РЗ на прикладі ПР мод. IRB 4600 – 20/2.05



24

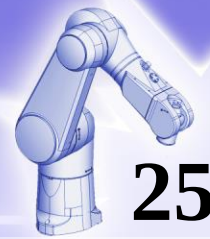


Координати **i -ої** точки РЗ ПР:



$$\begin{aligned} X_i^{PP} &= 1642,7 \text{ мм;} \\ Y_i^{PP} &= 942,8 \text{ мм;} \\ Z_i^{PP} &= 0 \text{ мм} \end{aligned}$$

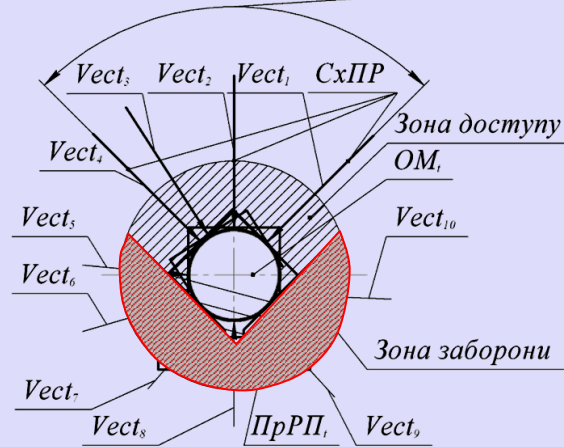
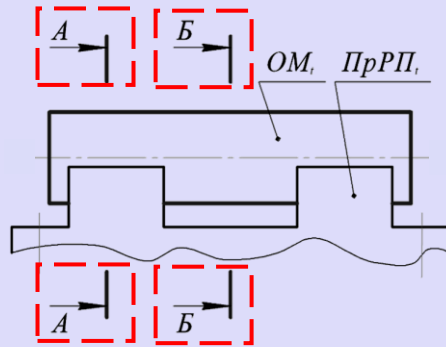
Множини аналізованих векторів підходу при технологічному обслуговуванні РП_t з ОМ_t в пристосуванні типу призма



25

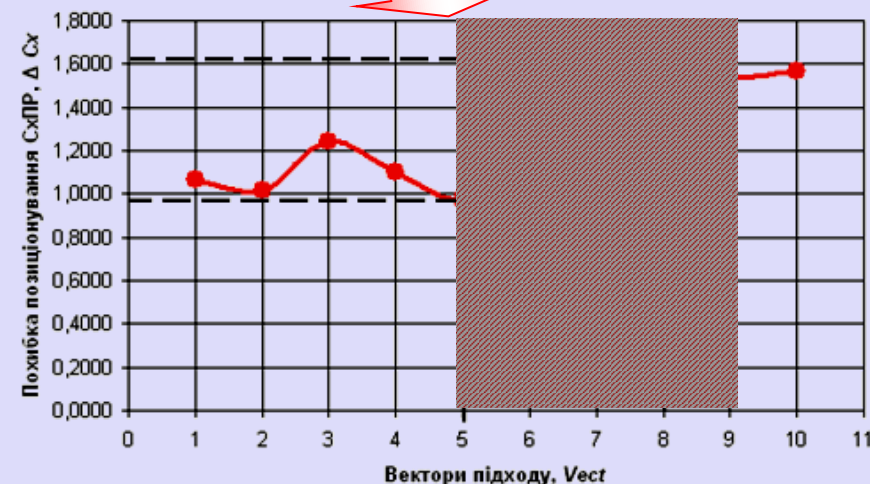
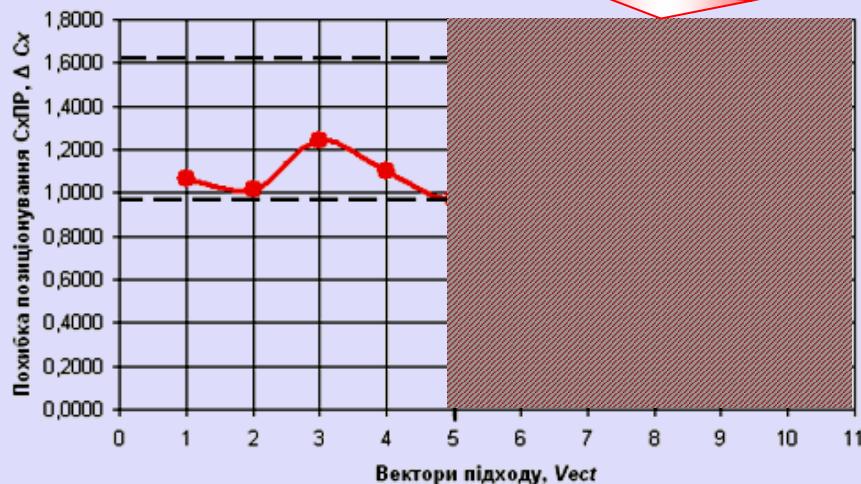
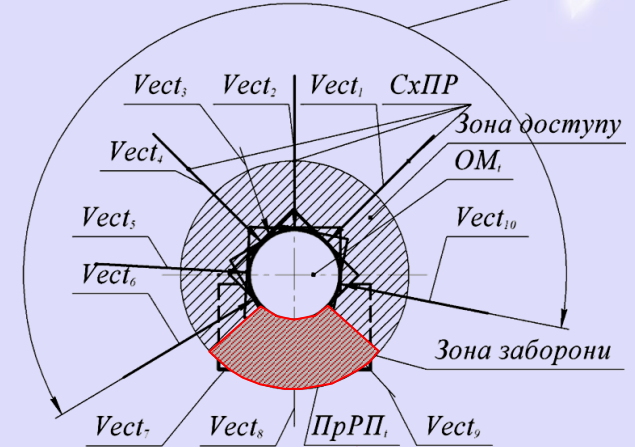
A-A

Множина можливих векторів підходу



Б-Б

Множина можливих векторів підходу

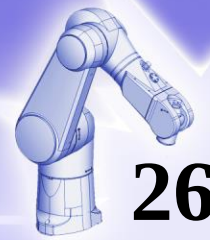


$$\left. \begin{array}{l} \Delta_{Cx_{min}} = 0,9854 \\ \Delta_{Cx_{max}} = 1,6124 \end{array} \right\}$$

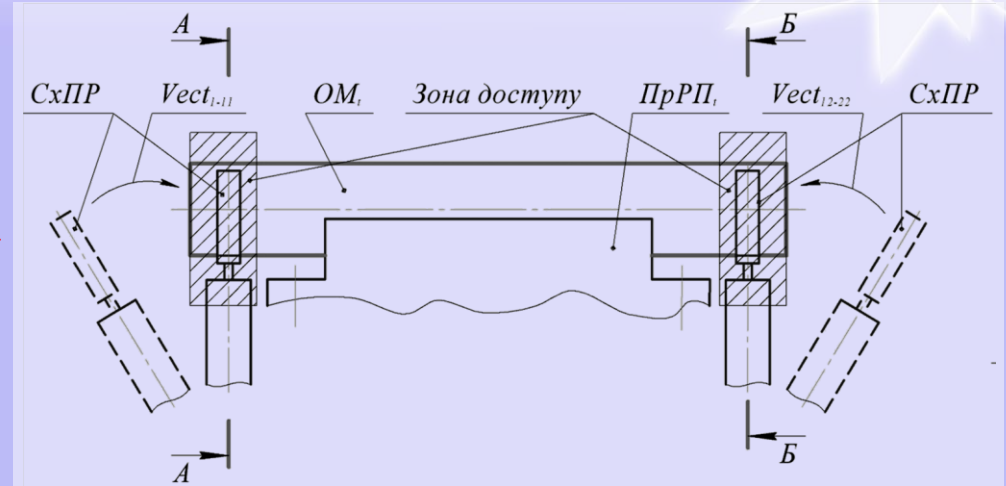
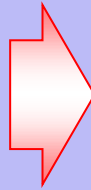
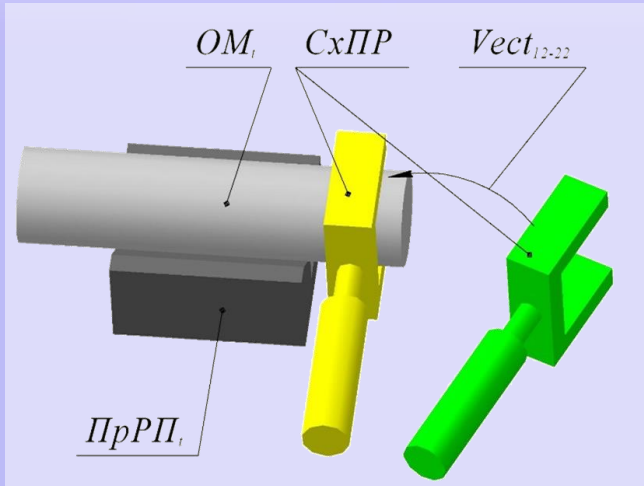


$$\frac{\Delta_{Cx_{max}} - \Delta_{Cx_{min}}}{\Delta_{Cx_{min}}} \cdot 100\% = \frac{1,6124 - 0,9854}{0,9854} \cdot 100\% = 63,6\%$$

Множини аналізованих векторів підходу при технологічному обслуговуванні $РП_t$ з $ОМ_t$ в пристосуванні типу призма

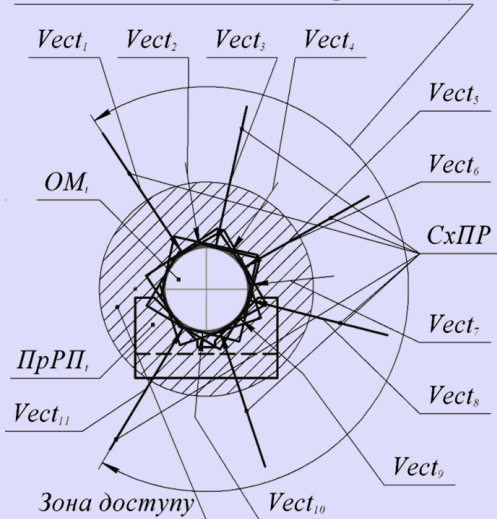


26



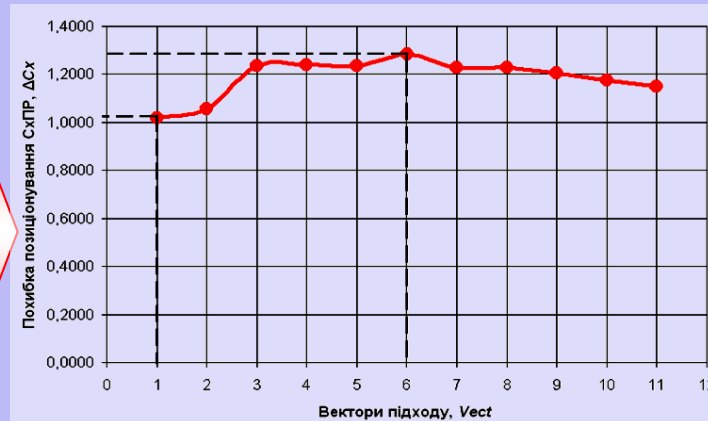
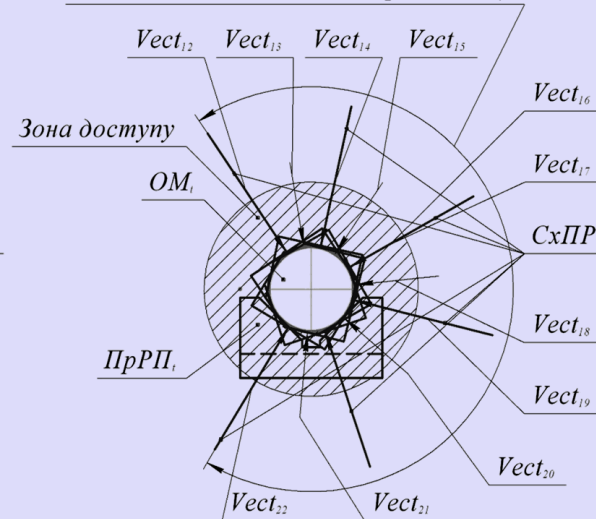
А-А

Множина можливих векторів підходу



Б-Б

Множина можливих векторів підходу

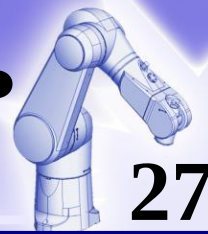


$$\Delta_{Cx_{min}} = 1,0312$$

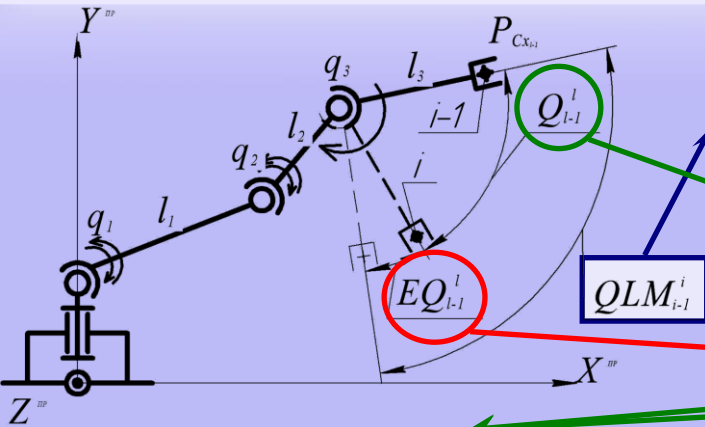
$$\Delta_{Cx_{max}} = 1,3875$$

$$\frac{\Delta_{Cx_{max}} - \Delta_{Cx_{min}}}{\Delta_{Cx_{min}}} \cdot 100\% = \frac{1,3875 - 1,0312}{1,0312} \cdot 100\% = 34,5\%$$

Q-модель точнісних характеристик МС ПР



27



Узагальнений кватерніон руху активних ланок QLM (Quaternion of Links' Movements) l -ої ланки відносно попередньої $(l-1)$ -ої ланки змістовно відображає врахування похибки в зчленуваннях активних ланок МС ПР при відпрацюванні ними УК:

$$QLM = f(Q, EQ)$$

$$QLM(v, s)_{l-1}^l = \left(Q_{l-1}^l \cdot EQ_{l-1}^l \right) \Big|_{Q_{l-1}^l = ROT_{l-1}^l} \vee \left(Q_{l-1}^l + EQ_{l-1}^l \right) \Big|_{Q_{l-1}^l = LIN_{l-1}^l}$$

Кватерніон ідеального руху ланок

$$Q_{l-1}^l(s; v) \in (LIN_{l-1}^l, ROT_{l-1}^l)$$

LIN_{l-1}^l – кватерніон лінійних рухів ланок МС ПР;

$$LIN_{l-1}^l(s; v) \in (0 + X \cdot \theta_{l-1}^l + Y \cdot \theta_{l-1}^l + Z \cdot \theta_{l-1}^l)$$

ROT_{l-1}^l – кватерніон кутових рухів ланок МС ПР;

$$ROT_{l-1}^l(s; v) = \left(\cos \frac{\theta_{l-1}^l}{2} + X \cdot \sin \frac{\theta_{l-1}^l}{2} + Y \cdot \sin \frac{\theta_{l-1}^l}{2} + Z \cdot \sin \frac{\theta_{l-1}^l}{2} \right)$$

Кватерніон похибок в зчленуваннях активних ланок

$$EQ(s, v)_{l-1}^l = \left(\cos \frac{\varepsilon_{l-1}^l}{2} + v \cdot \sin \frac{\varepsilon_{l-1}^l}{2} \right) \Big|_{Q_{l-1}^l = ROT_{l-1}^l \Rightarrow EQ_{l-1}^l = \varepsilon_{l-1}^l}$$

або

$$EQ(s, v)_{l-1}^l = (0 + v \cdot \delta_{l-1}^l) \Big|_{Q_{l-1}^l = LIN_{l-1}^l \Rightarrow EQ_{l-1}^l = \delta_{l-1}^l}$$

v – вектор, що вказує вісь відносно якої виконується рух $v \in (X, Y, Z)$

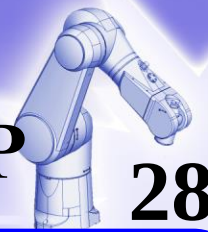
p_l – масив значень фактичних координат l -ої ланки в системі координат $(l-1)$ -ої ланки

$$p_{l-1}^l = \left(QLM_{l-1}^l \cdot l_l \cdot \overline{QLM_{l-1}^l} \right) \Big|_{QLM_{l-1}^l = ROT_{l-1}^l} \vee \left(l_l + QLM_{l-1}^l \right) \Big|_{QLM_{l-1}^l = LIN_{l-1}^l} \vee (p_l = (0, l))$$

Масив значень фактичних координат полюса Cx в системі координат ПР:

$$p_{Cx_i} = (((p_{L-1}^L + p_{L-2}^{L-1}) + p_{L-3}^{L-2}) + \dots + p_{L-l}^{L-l+1}) \Big| l = \overline{1, L}$$

Перевірка адекватності Q-моделі точнісних характеристик МС ПР



28

Перевірка з використанням методики порівняння двох середніх значень генеральних сукупностей (Q-моделі та матричної), дисперсії яких відомі (великі незалежні вибірки)

$$\begin{cases} H_{0_i} : \Delta_{матр} = \Delta_{кв} \\ H_{a_i} : \Delta_{матр} \neq \Delta_{кв}, \end{cases}$$

Перевірка статистичної гіпотези H_0 за спостережним критерієм:

$$Z_{cn} = \frac{\overline{\Delta_{матр}} - \overline{\Delta_{кв}}}{\sqrt{\frac{D_{матр}}{n_{матр}} + \frac{D_{кв}}{n_{кв}}}}$$

Визначення критичної точки $z_{кр}$ з використанням функції Лапласа із рівності:

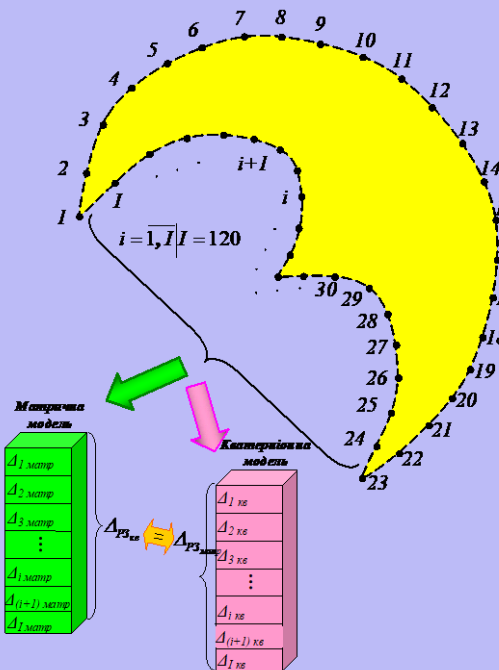
$$\Phi(z_{кр}) = \frac{(1 - \alpha)}{2} = 0,475$$

$$z_{кр} = 1,96$$

$$\xi = \frac{|\Delta_{матр} - \Delta_{кв}|}{\Delta_{матр}}$$

відносна похибка результатів моделювання

при $|Z_{cn}| < z_{кр}$ нульова статистична гіпотеза H_0 – приймається;
при $|Z_{cn}| > z_{кр}$ нульова статистична гіпотеза H_0 – відхиляється;



$I=120$

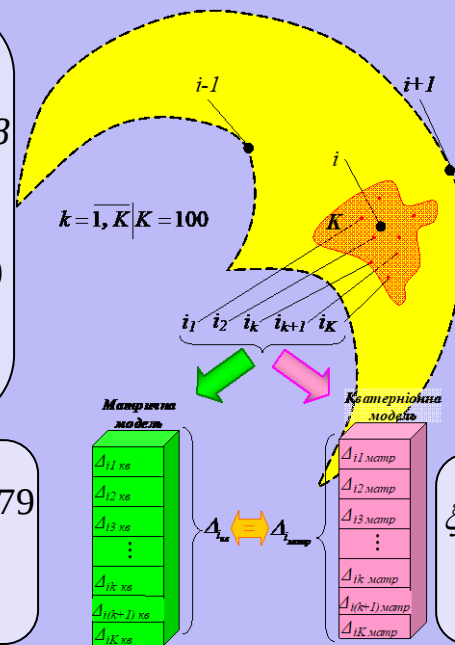
$$\Delta_{P3_матр} = 1,6435 \quad \Delta_{P3_кв} = 1,6448$$

$$Z_{cn_P3} = 1,342, \text{ тобто } (|Z_{cn_P3}| = 1,342) < (z_{кр} = 1,960)$$

$$\Delta_{P3_матр} = \Delta_{P3_кв}$$

$$\xi_{P3} = \frac{|1,6435 - 1,6448|}{1,6435} = 0,000079$$

$$(\xi_{P3} = 0,0079\%) < (\alpha = 5\%)$$



$X_i^{PP} = 1642,70 \text{ мм},$
 $Y_i^{PP} = 942,77 \text{ мм},$
 $Z_i^{PP} = 0$

$$\Delta_{i_матр} = 0,9831 \quad \Delta_{i_кв} = 0,9826$$

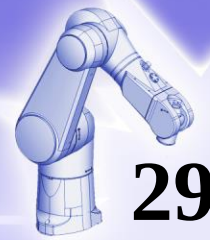
$$Z_{cn_i} = 1,103, \text{ тобто } (|Z_{cn_i}| = 1,103) < (z_{кр} = 1,960)$$

$$\Delta_{i_матр} = \Delta_{i_кв}$$

$$\xi_i = \frac{|0,9831 - 0,9826|}{0,9831} = 0,000051$$

$$(\xi_i = 0,0051\%) < (\alpha = 5\%)$$

Поняття атестації робочих зон ПР

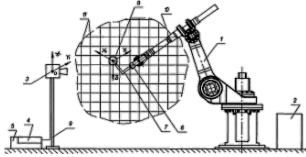


29

- *Errors Budgeting*, 2005 p.
Kurfess Thomas R., Frey Daniel D.

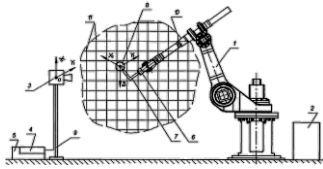
- *Errors Budgets*, 2010 p.
Gillespie LaRoux K., Donalson R.R.

- *стенд для контролю точності ПР*
(Патент. РФ №2472612, 2013 р.)



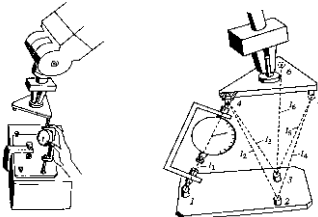
Нестеров В.Н., Мухин В.М., Мещанов А.В.
(ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН")

- *стенд для контролю точності ПР*
(Патент. РФ №2185953, 2002 р.)



Жеребятєв К.В., Кусов Р.Р.,
Судаков П.Е. (АТ "АВТОВАЗ")

- *на основі L-координатного стенду*
"Атестат", 2006 р.



Корендясєв А.І.

Атестацією робочих зон ПР (як процесу) в контексті даної проблеми є визначення сумарної похибки позиціонування СхПР як функції узагальнених координат ПР та точності їх відпрацювання в аналізованих конкретних вузлових та проміжних точках РЗ ПР.

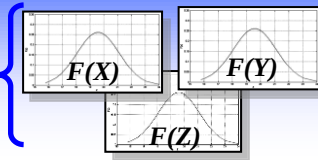
ПЕРЕВАГИ

- визначення емпіричних залежностей похибки позиціонування від складових маніпуляційної системи ПР;
- можливість визначення абсолютного значення похибки позиціонування;
- практична перевірка теоретичних досліджень

НЕДОЛІКИ

- обов'язкова наявність реального обладнання;
- наявність додаткових апаратних засобів визначення координат положення СхПР;
- значні енергетичні затрати, особливо при багаторазових дослідженнях точнісних параметрів робочої зони ПР;
- затрати часу на налагодження та переналадження вимірювальних стендів;
- матеріально-фінансові затрати на технічне обслуговування додаткового вимірювального обладнання;
- порівняно великі втрати часу на точнісні дослідження з використанням реального обладнання

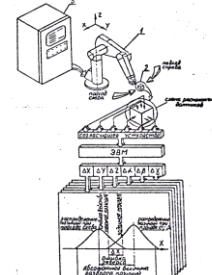
Результат



$\Delta_{\text{ПР}}$

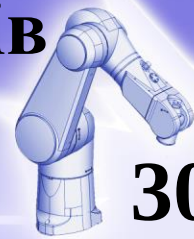
$M_x; M_y; M_z$
 $\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z$
 $r_{xy}; r_{zx}; r_{zy}$

- *на основі 6 датчиків положення*, 1992 р.



Карбовський В.П.

Складові розв'язування задач I та II етапів пропонуваної методики проведення програмної точнісної атестації РЗ ПР



30

ЕТАПИ ПРОГРАМНОЇ ТОЧНІСНОЇ АТЕСТАЦІЇ РЗ ПР

ВИХІДНІ ДАНІ

- конструктивні параметри ланок МС ПР;
- УК в зчленуваннях ланок МС ПР (кути поворотів навколо осей системи координат ПР (A, B, C) та/або величини лінійних переміщень вздовж відповідних осей системи координат ПР (X, Y, Z)) приводів;

елементарні похибки в зчленуваннях МС ПР

I етап

Формування кінематичної моделі МС ПР

Задача I.1. Формалізований опис МС ПР

$$\begin{aligned} \text{ФО МС ПР (модель)} = &= (\pm Q_1 l_1 [H_1] Q_{2-1-0} C_{1-2} \pm \\ &\pm Q_1 2l_2 [H_2] Q_{2-1} C_{2-3} \dots \\ &\dots \pm Q_l m_l [H_l] Q_{l-1} C_{l-(l+1)} C_{l-(l+1)} Gr = \\ &= (\pm Q_l m_l [H_l] Q_{l-1} C_{l-(l+1)} C_{l-(l+1)} Gr = 1, L) Gr \end{aligned}$$

Задача I.2. Визначення координат положення полюса СхПР в i-ій точці РЗ ПР, що задаються системою керування без врахування похибок

$$\begin{aligned} p_{i-1}^i = & \left(Q_{i-1}^i \cdot l_i \cdot Q_{i-1}^i \right)_{QLM_{i-1}^i = ROT_{i-1}^i} \vee \\ & \vee \left(l_i + Q_{i-1}^i \right)_{QLM_{i-1}^i = LIN_{i-1}^i} \vee (p_i = (0, l)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{c Cx_i} = & \left(\left(p_{c L-1}^L + p_{c L-2}^{L-1} \right) + \right. \\ & \left. + p_{c L-3}^{L-2} \right) + \dots + \\ & \left. + p_{c L-l}^{L-l+1} \right) | l = \overline{1, L} \end{aligned}$$

ПРОМІЖНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Координати положення полюса СхПР в i-ій точці РЗ, що задаються системою керування без врахування похибок в зчленуваннях

$$P_{c Cx} = [X_c, Y_c, Z_c]^T$$

$$P_{c Cx} = P_{i Cx}$$

до III етапу

II етап

Формування точнісної моделі МС ПР

Задача II.1. Визначення необхідної загальної кількості (K) переміщень Сх в i-ту точку РЗ ПР

Задача II.2. Формування масивів похибок в зчленуваннях МС ПР

$$\begin{aligned} \Delta_{i-1}^i = & \left[\left(\varepsilon_{A_k}^n | k = \overline{1, K} \right) \left(\varepsilon_{B_k}^n | k = \overline{1, K} \right) \right. \\ & \left(\varepsilon_{C_k}^n | k = \overline{1, K} \right) \left(\delta_{X_k}^n | k = \overline{1, K} \right) \\ & \left. \left(\delta_{Y_k}^n | k = \overline{1, K} \right) \left(\delta_{Z_k}^n | k = \overline{1, K} \right) \right]^T \end{aligned}$$

Задача II.3. Формування точнісної моделі МС ПР

$$\begin{aligned} p_{i-1}^i = & \left(QLM_{i-1}^i \cdot l_i \cdot QLM_{i-1}^i \right)_{QLM_{i-1}^i = ROT_{i-1}^i} \vee \\ & \left(l_i + QLM_{i-1}^i \right)_{QLM_{i-1}^i = LIN_{i-1}^i} \vee (p_i = (0, l)) \end{aligned}$$

ПРОМІЖНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Масив фактичних координат положення полюса СхПР в i-ій точці РЗ з врахуванням похибок

$$P_{i k Cx} = [X_{i k}, Y_{i k}, Z_{i k}]^T;$$

$$P_{i Cx} = (P_{i k Cx}, P_{i k Cx}, \dots, P_{i k Cx}, P_{i k Cx}, P_{i k Cx});$$

$$P_{c Cx} \neq P_{i k Cx} \neq P_{i(k-1) Cx};$$

до III етапу

Складові розв'язування задач III етапу пропонованої методики проведення програмної точнісної атестації РЗ ПР



31

від
I етапу

від
II етапу

III етап

Оцінка похибок позиціонування СхПР з врахуванням
імовірнісних параметрів

Задача III.1. Визначення
похибки позиціонування
полюса СхПР в i -ій точці РЗ
ПР

Задача III.2. Визначення
параметрів законів розподілу
похибки позиціонування в i -
ій точці РЗ ПР
(математичних очікувань
 m_{xi} , m_{yi} , m_{zi} ;
середньоквадратичних
відхилень σ_{xi} , σ_{yi} , σ_{zi} ; матриць
коваріації; коефіцієнтів
кореляції r_{xyi} , r_{yzi} , r_{xzi})

Задача III.3. Графічне
представлення функцій
розподілу густини ймовірності
похибки позиціонування
($F(X^{PP})$, $F(Y^{PP})$, $F(Z^{PP})$) та їх
попарна композиція ($F(X^{PP}Y^{PP})$,
 $F(X^{PP}Z^{PP})$, $F(Y^{PP}Z^{PP})$).
Побудова еліпсоїду розподілу
похибки позиціонування в
тримірному просторі
($F(X^{PP}Y^{PP}Z^{PP})$)

РЕЗУЛЬТАТИ

Інформація про
розподіл похибок
позиціонування СхПР
в межах РЗ ПР.

Множини можливих векторів
підходу
в точки РЗ ПР.

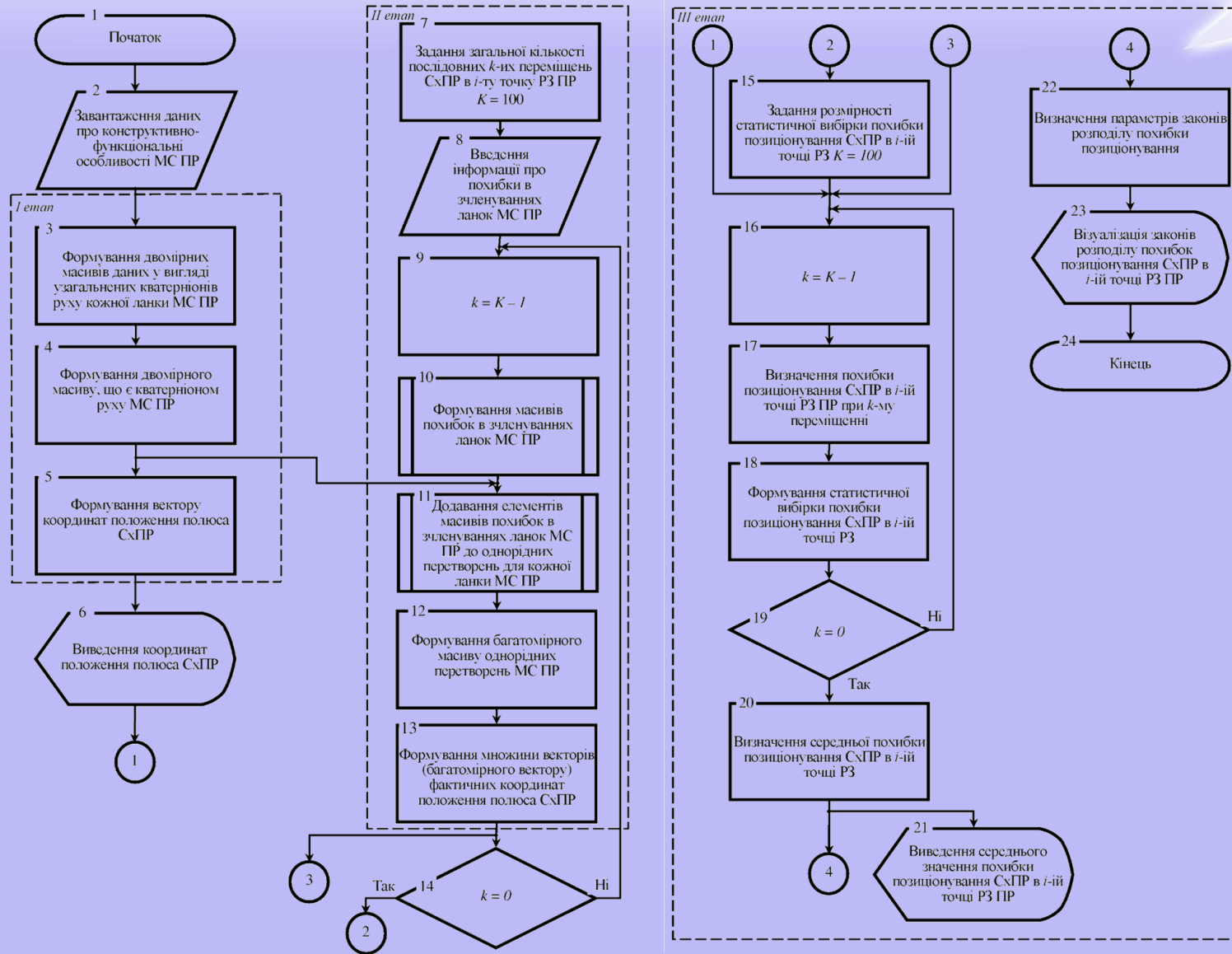
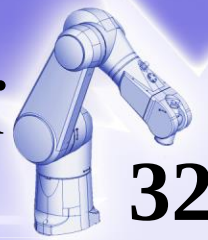
Рекомендації щодо:

– використання методів та
засобів зменшення похибок
позиціонування СхПР в
межах секторів з відповідною
точністю;

– розміщення ТО з різними
вимогами щодо точності
встановлення та базування
 OM_{t-1} в ПрРП_с;

– вибору оптимальних за
точністю позиціонування
СхПР векторів підходу в
певну i -ту точку, яка
належить сектору з
відповідною точністю

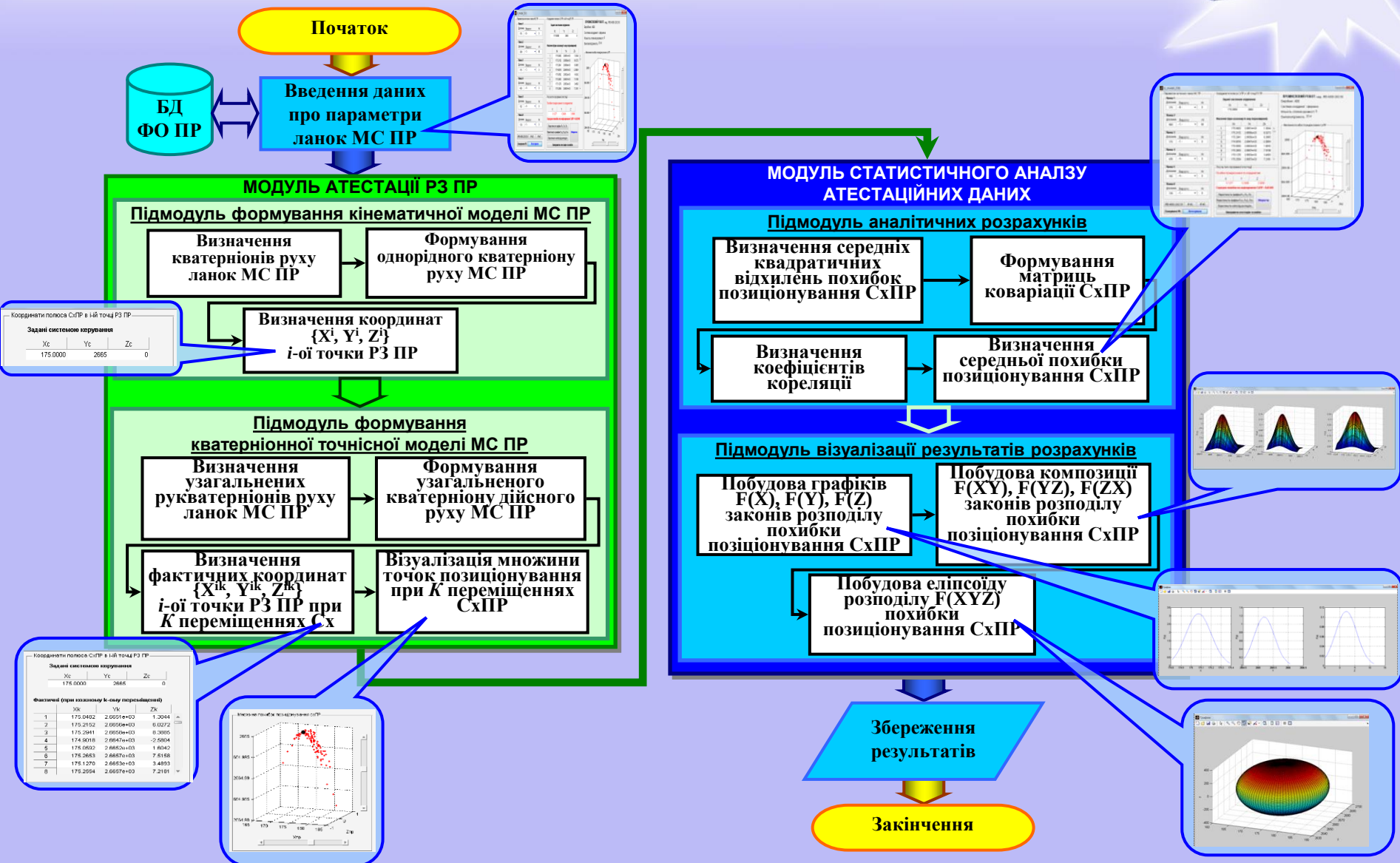
Блок-схема узагальненого алгоритму проведення програмної точнісної атестації РЗ ПР



Узагальнена структурна схема розробленого програмного забезпечення програмної точнісної атестації РЗ ПР



33



Розроблене програмне забезпечення проведення програмної точнісної атестації РЗ ПР



34

IRB_4600

Промисловий робот IRB 4600-2,50/20

Координати полюса СхПР в і-й точці РЗ ПР

Задані системою керування

Xc	Yc	Zc

Множина похибок позиціонування СхПР

$$C=(X_C^{PP}, Y_C^{PP}, Z_C^{PP})$$

Введення значень узагальнених

тичні (при кожному k-му переміщенні)

Xk	Yk	Zk

Результати програмної атестації

Позиціонування по координатам:

X = 2 Y = 2.0 Z = 2.97336

Середня похибка позиціонування СхПР = 0.599641

Переглянути графіки Fx,Fy,Fz

Переглянути графіки Fxy,Fzy,Fzx

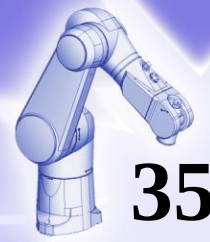
Метод розподілу

Зберегти результати

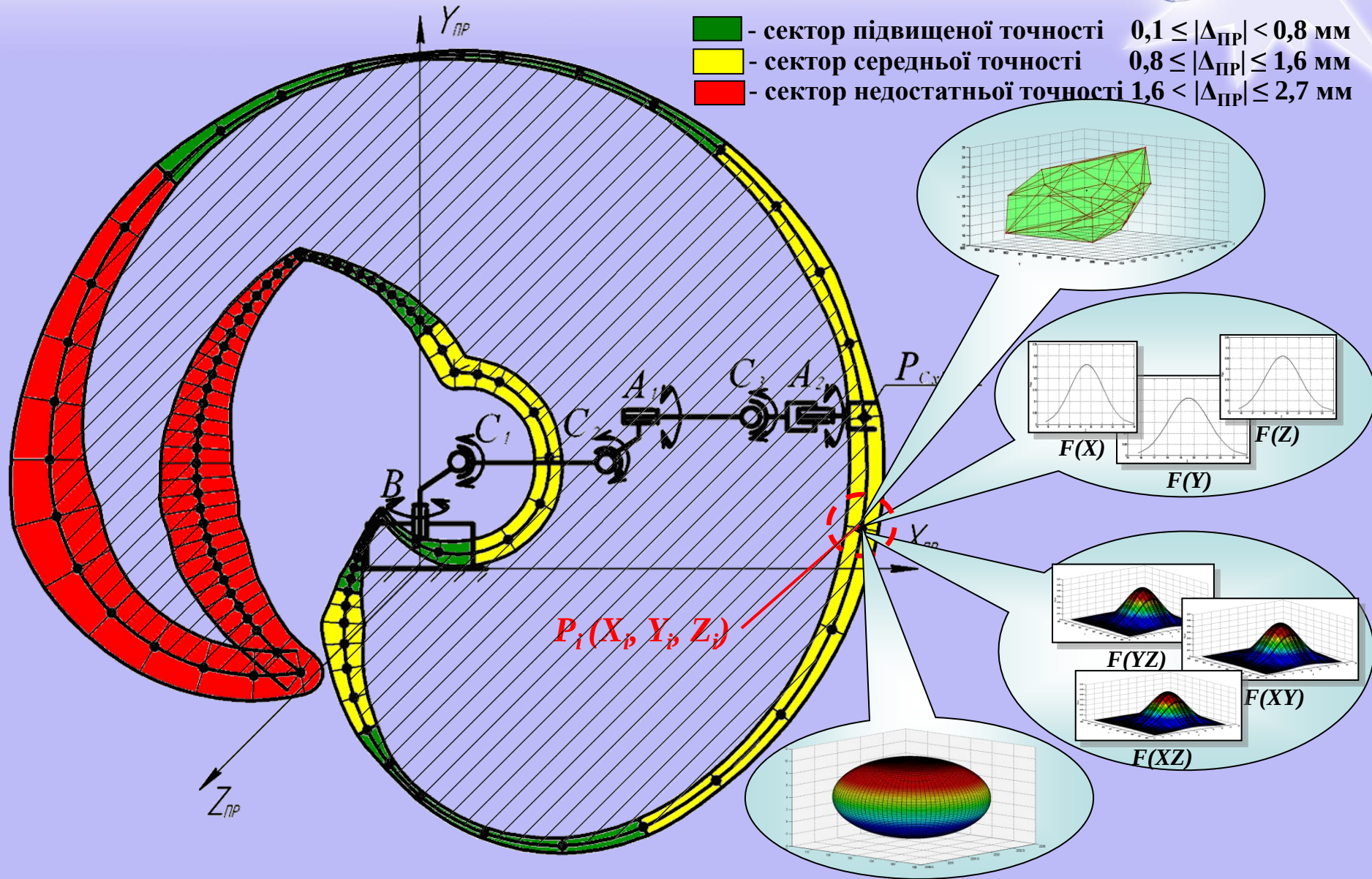
Збереження результатів атестації у форматі *.xls

Результат програмної атестації РЗ ПР на прикладі ПР мод. IRB 4600-20/2.50,

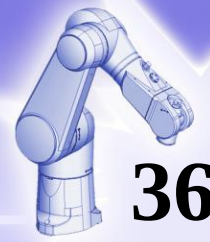
$$\Delta_{\text{ПР мод. IRB 4600}} = \pm 0,8 \text{ мм}$$



35

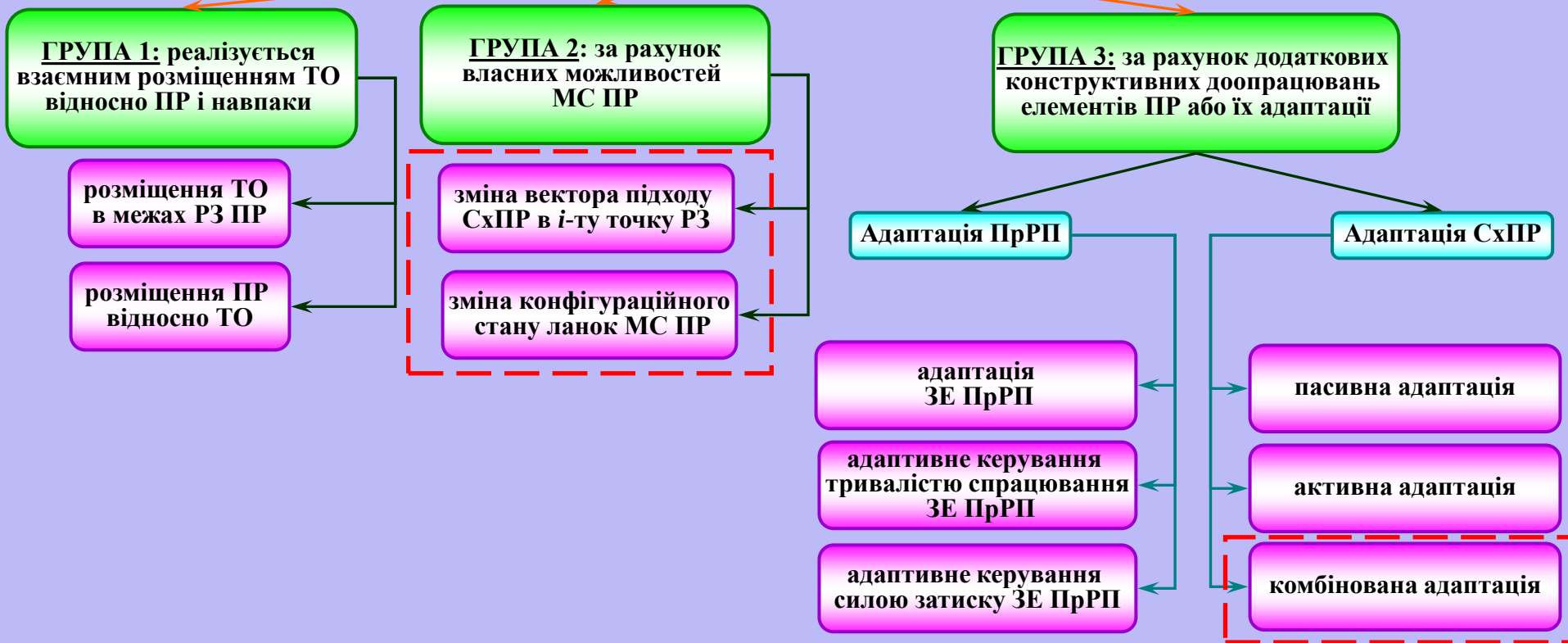


Пропоновані групи методів зменшення похибок позиціонування СхПР

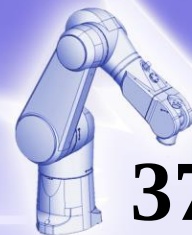


36

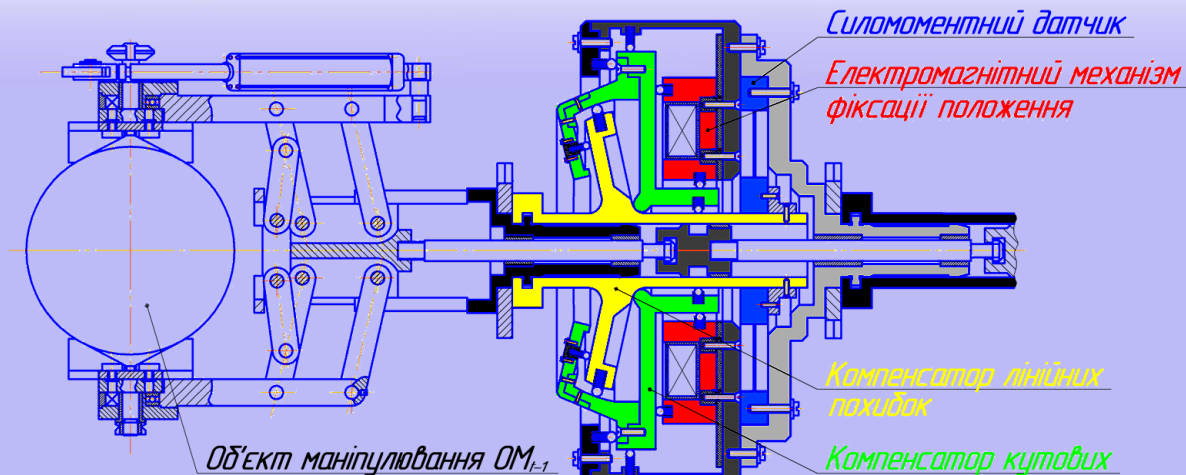
МЕТОДИ зменшення похибок позиціонування СхПР



Основні конструктивні елементи пристрою адаптації СхРР до явища FC

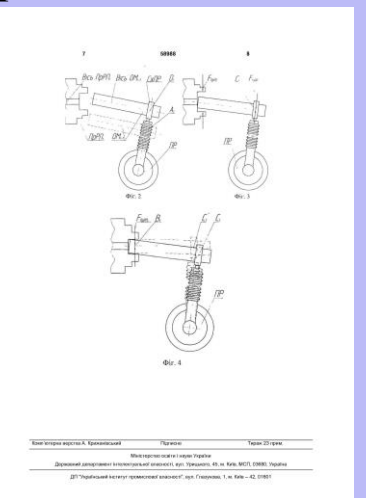
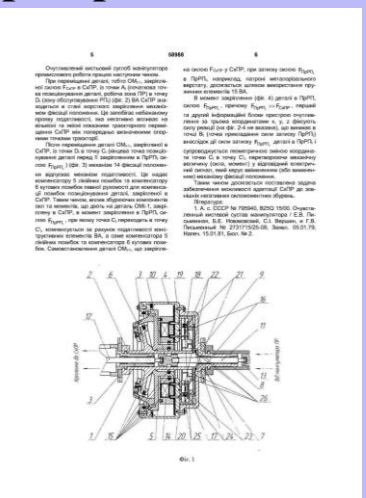


37

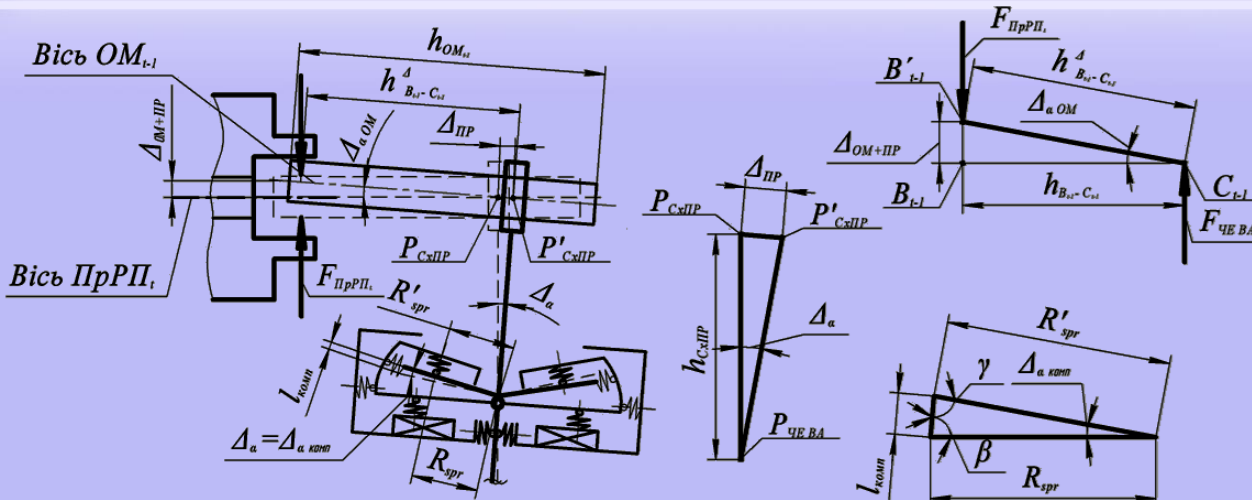


Патент України на корисну модель №58988 (Бюл. №8, 2011)
автори: Кирилович В.А., Сазонов А.Ю.

Очутливлений кистьовий суглоб маніпулятора промислового робота



38



Компенсувальний кут:

$$\Delta_{\alpha} = \arccos \frac{h_{C_{xPP}}^2 + h'_{C_{xPP}}^2 - \Delta_{PP}}{2 \cdot h_{C_{xPP}} \cdot h'_{C_{xPP}}}$$

Величини деформацій пружинних елементів компенсаторів:

$$l_{\text{комн}} = R_{\text{Spr}}'^2 + R_{\text{Spr}}^2 - 2 \cdot R_{\text{Spr}}' \cdot R_{\text{Spr}} \cdot \cos \Delta_{\alpha \text{комн}}$$

BA CxPP

ЧЕ Mega 860

$$S = 17000 H / B$$

Роздільна здатність:

$$F_{xy} = 5 H$$

$$F_z = 10 \text{ H}$$

Максимальне
навантаження F_{CE_max}
на кожен вісь:

$$F_{xy} = \pm 250\,000 \text{ H}$$

$$F_z = \pm 330\,000\text{ H}$$

MΦΠ

$$\overline{T_{M\Phi\Pi}} = 0,11c$$

Чутливість ЧЕ до прикладеної сили:

$$S = \frac{dF_{QE}}{dU_{QE}}$$

Розрахнукова сили реакції ЧЕ:

$$F_{qE_p} = F_{PpPI} \cdot h_{B_{t-1}-C_{t-1}}^{\Delta} \cdot \frac{h_{C_{xIP}}^2 + h_{C_{xIP}}'^2 - \Delta_{IP}}{2 \cdot h_{C_{xIP}} \cdot h_{C_{xIP}}'}$$

Тривалість спрацювання МФП:

$$T_{M\Phi\Pi} = \frac{L}{R} \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{i_{\text{ноч}}}{i_{\text{всч}}}}$$

OM

$$h_{OM} = 150 \text{ мм},$$

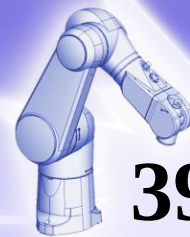
$$D = 50 \text{ } \mu\text{m},$$

$$h_{B,1-C,1} = 100 \text{ mm}$$

$$F_{\varphi_{E_p}} = 160 \kappa H$$

$$F_{\text{QE max}} > 160 \kappa H > F_{\text{QE min}}$$

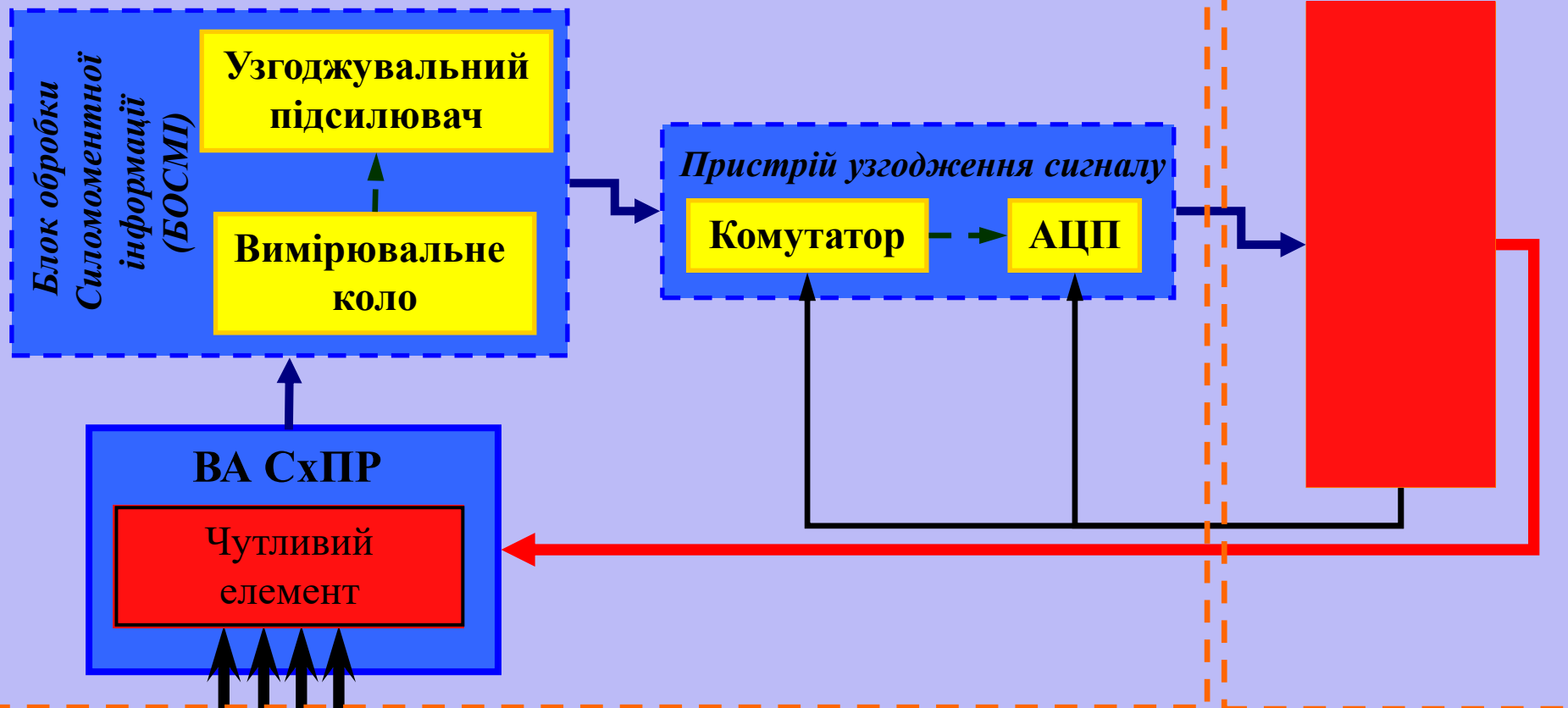
Структурна схема системи керування ВА СхПР до явища FC



39

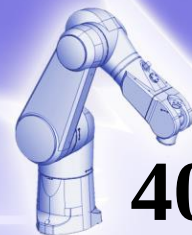
ССО

СК ВА СхПР

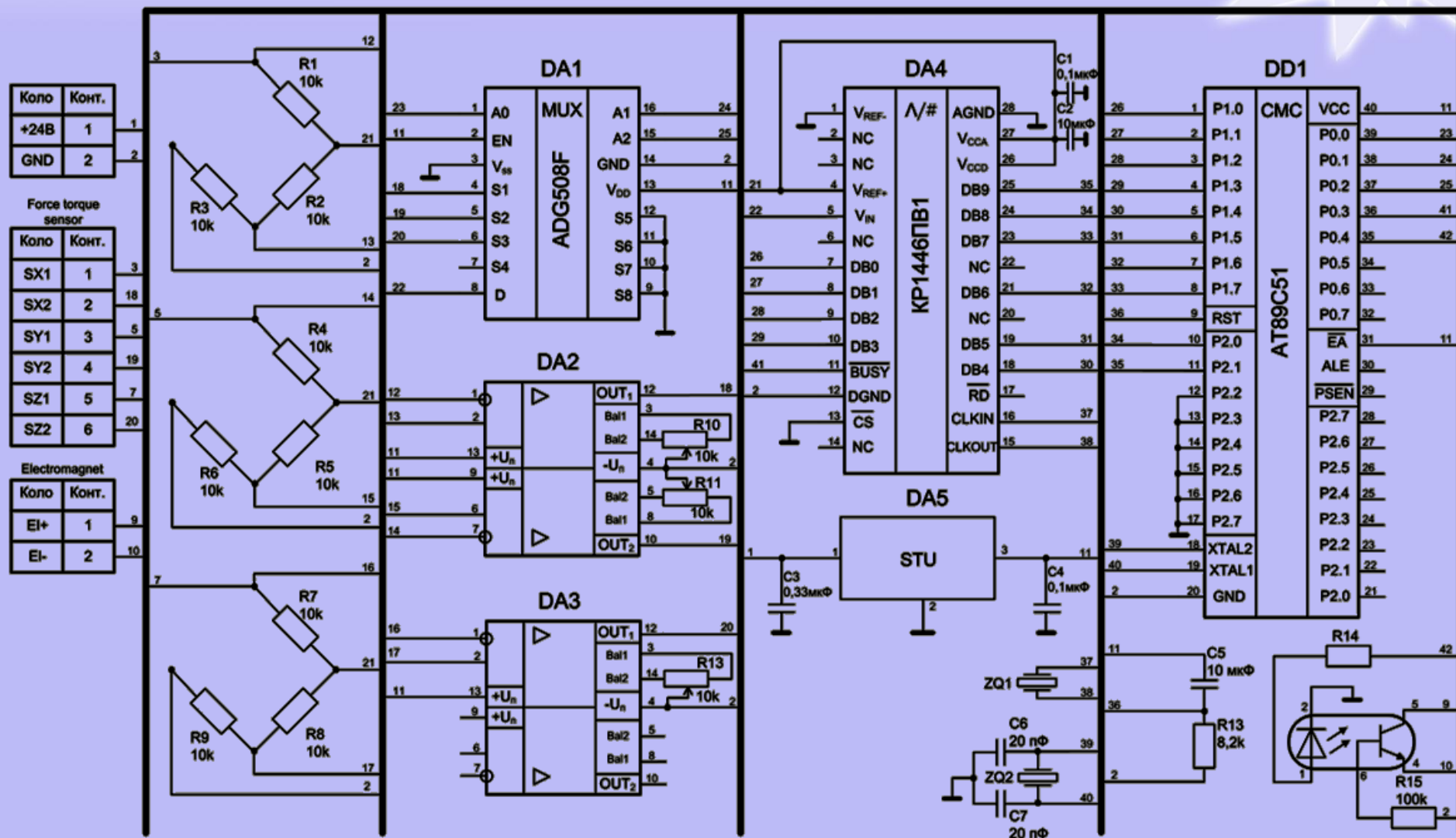


Сили та моменти, що
виникають внаслідок явища FC
(збурення)

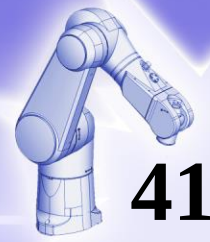
Принципова електрична схема системи керування ВА СхПР до явища FC



40

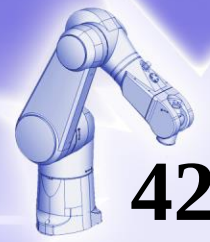


Напрямки подальших досліджень



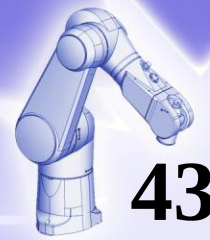
1. Проведення точнісних досліджень для МС ПР складної кінематичної структури, наприклад, з паралельною кінематикою, та перевірка можливості застосування запропонованої гіпотези щодо можливого взаємного накладання та/або компенсації похибок в зчленуваннях ланок їх МС.
2. Інтеграція розробленого ПЗ програмної точної атестації РЗ ПР та розрахунку конструктивних параметрів ВА СхПР з іншими програмними засобами та комплексами для забезпечення універсальності його використання та реалізацію єдиного системного підходу до проектування ГКІС механоскладання.
3. Вдосконалення запропонованої конструкції ВА СхПР шляхом розробки механізму фіксації положення компенсаторів іншого фізичного принципу їх роботи, що забезпечить підвищення його швидкодії та надійності утримання компенсаторів похибок.

Загальні висновки



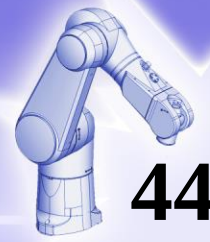
1. В даній роботі наведено теоретичні узагальнення і новий підхід до підвищення якості та зменшення трудомісткості проектування складних розподілених у просторі організаційно-технічних об'єктів і комплексів ГКІС, зокрема ГВК як складової останніх, шляхом розробки та застосування методичного, алгоритмічного, програмного забезпечення автоматизації процесу керування точністю ПР, а також програмно-апаратних засобів комбінованої адаптації СхПР на етапі виконання технологічних переходів встановлення/зняття об'єктів маніпулювання в/з пристосування робочих позицій при технологічному обслуговуванні ПР основного та допоміжного технологічного обладнання ГВК.
2. Визначено залежність величини похибки позиціонування Сх від конфігураційного стану ланок МС ПР та вектору підходу в будь-яку наперед задану точку його робочої зони, що дозволяє вибрати оптимальні за мінімумом похибки позиціонування Сх конфігураційні стани ланок МС ПР при технологічному обслуговуванні ПР технологічного обладнання механоскладальних ГВК (ГКІС). Отримані залежності розглянутих прикладів вказують на те, що зміна конфігураційних станів ланок МС ПР може призводити до відносної зміни точності позиціонування на 43,7%, 67,4% та 81,7%, а зміна векторів підходу для різних типів пристосувань, що забезпечують позиціонування СхПР в i -ій точці РЗ ПР, може призводити до відносної зміни точності позиціонування на 63,6% та 34,5%.

Загальні висновки



3. Розроблено точнісну кватерніонну модель МС ПР, яка відтворює їх точнісні та конструктивно-технологічні особливості, дозволяє методом моделювання автоматизовано визначати та аналізувати величини похибок позиціонування СхПР в РЗ та окремих її точках, а також забезпечує зменшення операційного навантаження ЕОМ і передбачає можливість свого подальшого комплексного використання на засадах єдиного системного підходу щодо аналізу кінематичних та точнісних характеристик МС ПР. Перевірка працездатності вказує на те, що відносна похибка моделювання порівняно з загальновідомою матричною моделлю становить 0,0079% – для $I = 120$ точок РЗ ПР, та 0,0051% – при багаторазових ($K = 100$ раз) переміщеннях СхПР в i -ту точку його РЗ. Вказані відносні похибки не перевищують рівня значущості $\alpha = 5\%$.
4. Запропоновано багатоетапну методику точнісної програмної атестації робочих зон ПР як складової технологічної підготовки роботизованих виробництв, що дозволяє науково-обґрунтовано розв'язувати задачу зменшення негативного впливу явища конфлікту сил при технологічному обслуговуванні ПР пристосувань робочих позицій ГВК.
5. За результатами роботи запропонованої методики точнісної програмної атестації робочих зон ПР сформовано рекомендації щодо застосування можливих методів та засобів зменшення похибок позиціонування СхПР при автоматизованому синтезі роботизованих механоскладальних технологій, що надають можливість зменшити негативний вплив похибок позиціонування СхПР при технологічному обслуговуванні ПР пристосувань робочих позицій в конкретних виробничих умовах.
6. Розроблено конструкцію програмно-апаратного вузла комбінованої адаптації СхПР до негативних силомоментних збурень в умовах конфлікту сил, що надає можливість зменшити наявні силомоментні навантаження в зчленуваннях ланок МС ПР та інших його конструктивних елементах за рахунок пружних властивостей компенсаційних елементів запропонованої конструкції. Новизна технічних рішень пропонуваного вузла адаптації підтверджена патентом України на корисну модель № 58988.

Загальні висновки



7. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення програмної точнісної атестації РЗ ПР, що відтворюють запропоновану багатоетапну методику точнісної програмної атестації робочих зон ПР та дозволяють автоматизувати процес керування точністю ПР. Програмне забезпечення може також використовуватись для розв'язування низки задач проектування механоскладальних ГВК.
8. Отримані результати підтверджують працездатність розроблених програмних засобів при дослідженні основних кінематичних структур ПР, що вказують на необхідність автоматизованого керування точністю ПР та зменшення трудомісткості проектування і підвищення обґрунтованості рішень, а також підвищення продуктивності функціонування ГВК як складових ГКІС в цілому.
9. Розроблене методичне, інформаційне, алгоритмічне та програмне забезпечення використовується в рамках дослідницької та науково-методичної роботи кафедри РЕ та А ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету “Житомирська політехніка” за напрямком “Автоматизація технологічної підготовки гнучких виробничих систем”
10. Проведено впровадження виконаних розробок у навчальний процес Державного університету “Житомирська політехніка” при вивченні навчальних дисциплін “Передові технології в автоматизованому виробництві” при підготовці фахівців за напрямом “Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка.