

ADVANCED TECHNOLOGIES IN AUTOMATED PRODUCTION

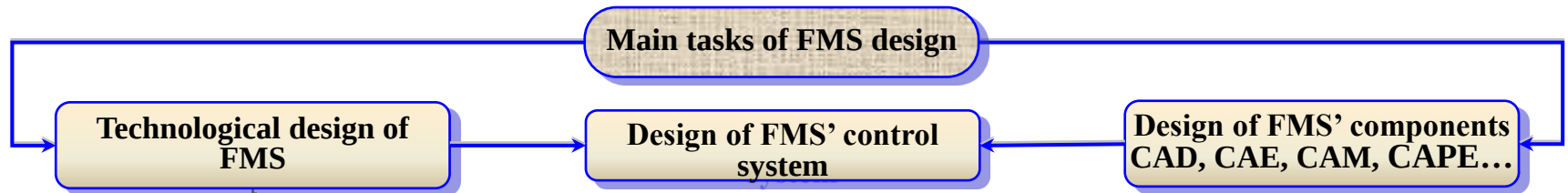
Automated synthesis of optimal robotic trajectories in mechanical-assembling FMC of engineering and instrument making

Eng. Sc. D. Valerii KYRYLOVYCH

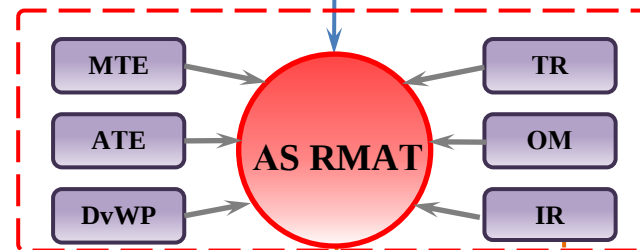
Professor of the Department of Robotics, Electroeneogetics and Automation
named after prof. B.B. Samotokin

Zhytomyr Politechnic State University, Ukraine

THE STRUCTURE AND CONTENT OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



Main tasks of FMS Technological design



Automated control of IR Gr's interaction with OM

Формування інформаційних моделей складових ГВК



Визначення параметрів складових взаємодії ЗППР з ОМ

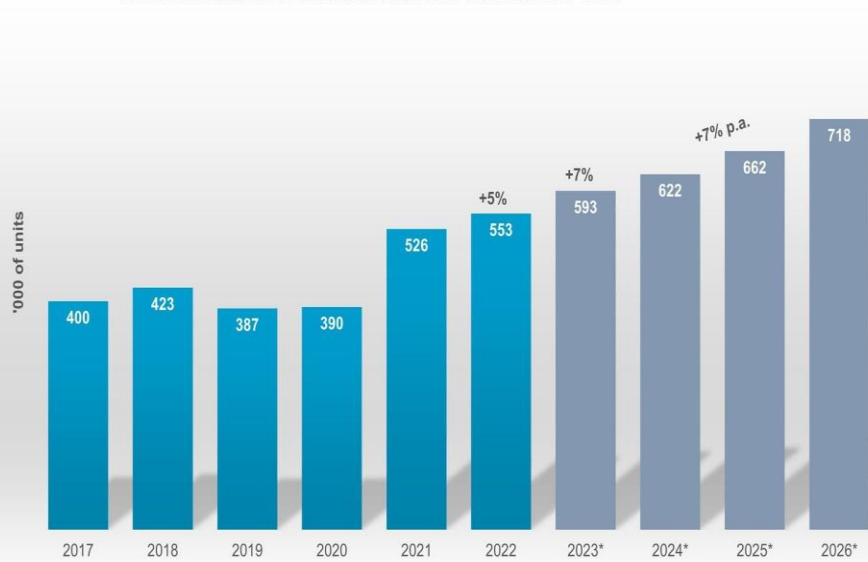


Визначення оптимальних траєкторій за τ_{min} , E_{min}

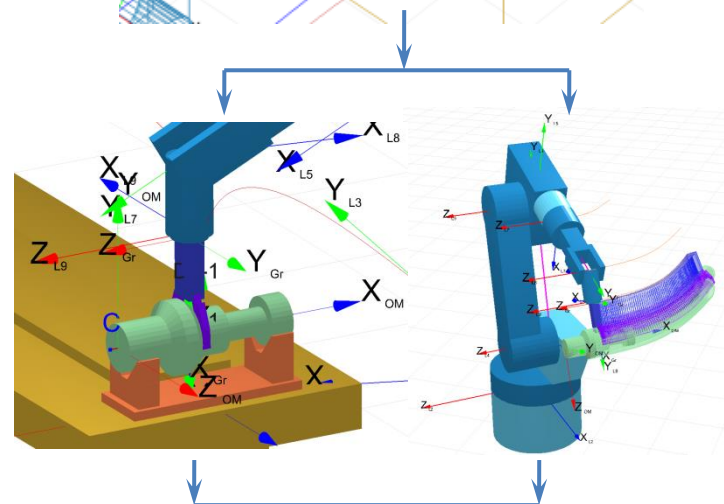
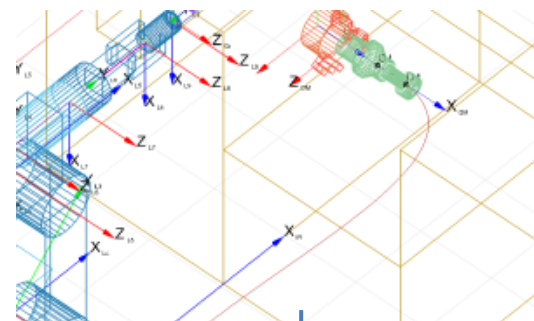
Підготовка даних до формування УП ПР

CURRENT STATE OF WORLD ROBOTICS PRODUCTION (IFR)

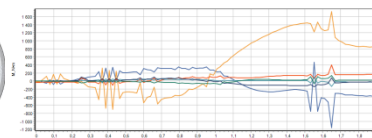
Annual installations of industrial robots 2017-2022 and 2023*-2026*



Source: International Federation of Robotics



τ, c



$M, H \cdot m$

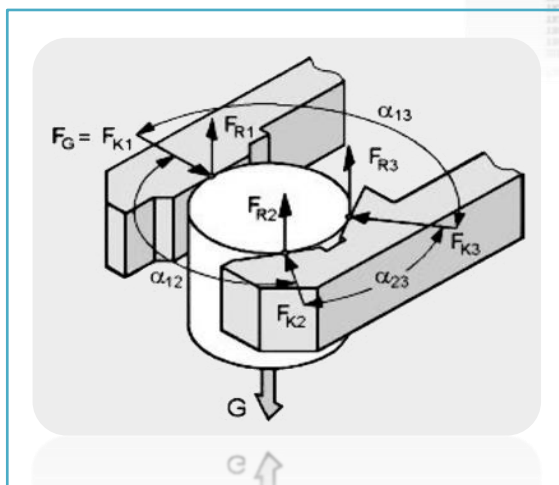
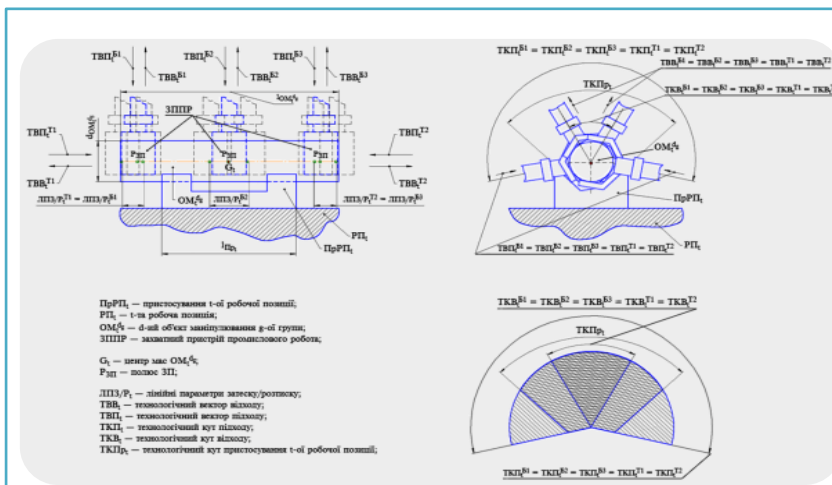


$E, Bt \cdot god$



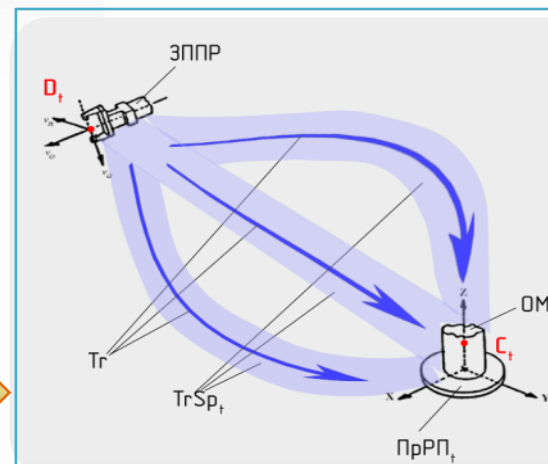
ESSENCE OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION (OM)

Vector-Proective (V-P)



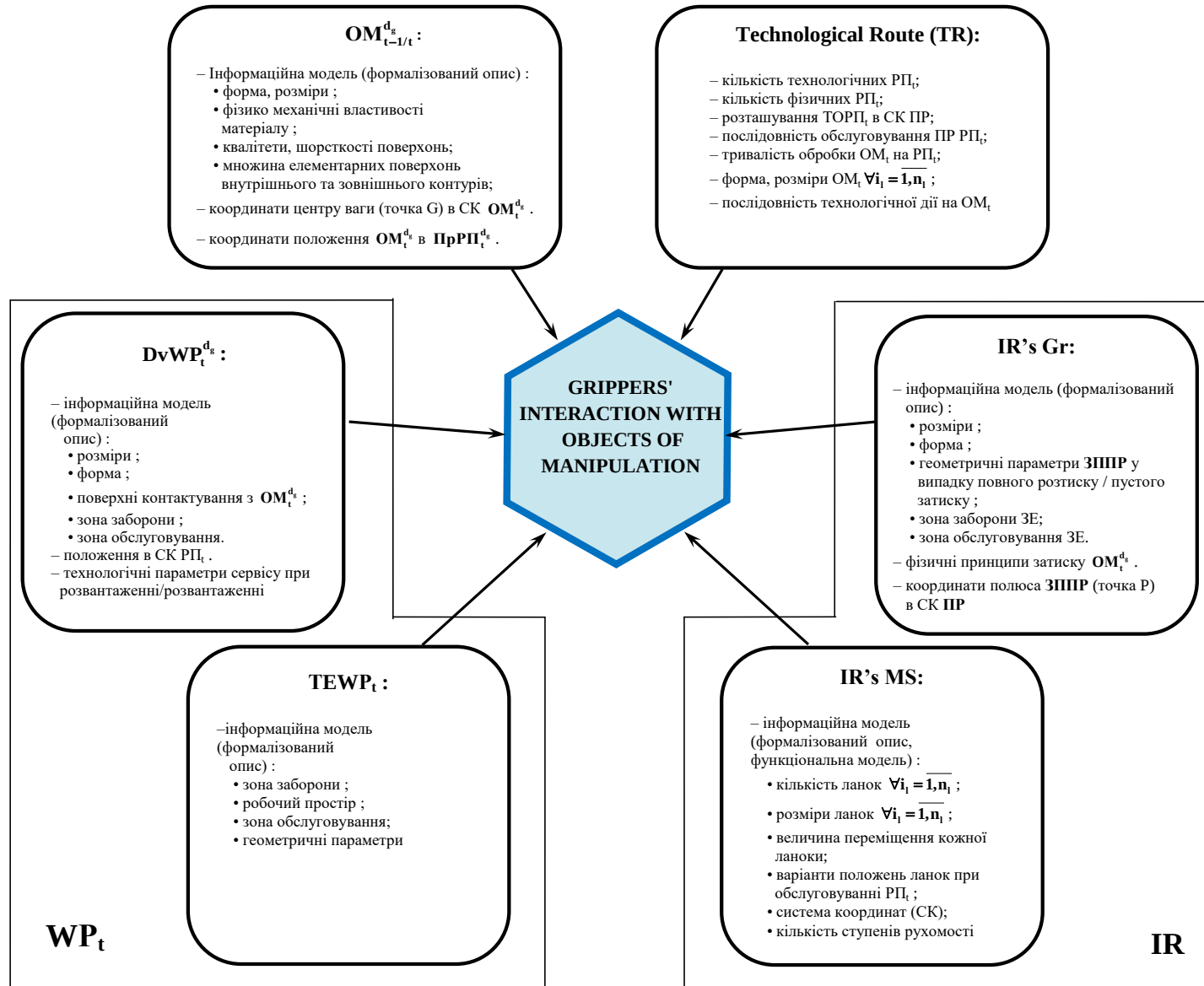
Geometrically-Force (G-F)

GRIPPERS'
INTERACTION WITH
OBJECTS OF
MANIPULATION



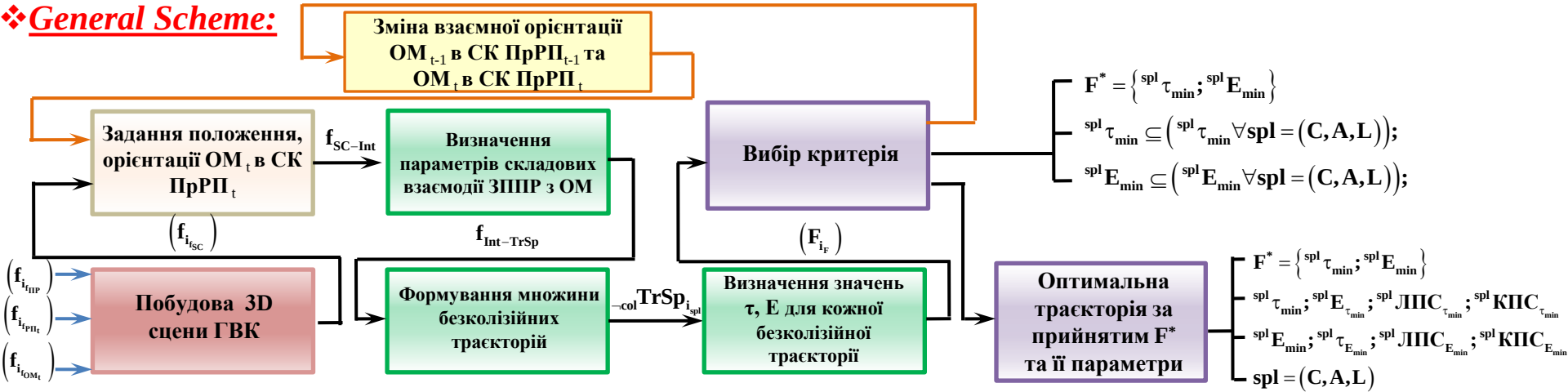
Trajectory-Dynamic (T-D)

THE IMPACT FACTORS ON GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



THE STATEMENT OF THE PROBLEM TASKS

❖ General Scheme:



❖ Formalization:

$$\langle \mathbf{f}_i | \mathbf{i}_f = \overline{1, n_f} \rangle : \left[\left(\left(\left(\left(\mathbf{f}_{PPt} \leftrightarrow (\mathbf{f}_{TOPPt} \times \mathbf{f}_{PPPPt}) \right) \times (\mathbf{f}_{PP} \leftrightarrow (\mathbf{f}_{ZPPP} \times \mathbf{f}_{MSPR})) \right) \leftrightarrow \mathbf{f}_{SC} \right) \times \mathbf{f}_{OM} \mid t = \overline{1, T} \right) \xrightarrow{\mathbf{f}_{SC-Int}} \right.$$

$$\xrightarrow{\mathbf{f}_{SC-Int}} (\mathbf{f}_{B-P} \times \mathbf{f}_{G-C} \times \mathbf{f}_{T-D}) \xrightarrow{\mathbf{f}_{Int-TrSp}} \left({}_{-col} \text{TrSp}_{i_{spl}} \mid \mathbf{i}_{spl} = \overline{1, n_{spl}}; spl = (C, A, L) \right) \xrightarrow{\mathbf{f}_{E2}, \mathbf{f}_{E3}} \left[\left(\left(\exists \mathbf{F}_{i_F^*} \mid \mathbf{i}_{F^*} = \overline{1, n_{F^*}} \right)_{min} \subset (\mathbf{F}_{i_F} \mid \mathbf{i}_F = \overline{1, n_F}) \right) \right]$$

$$\left| \mathbf{F}^* = \left\{ \left(\forall^{spl} \tau_{min_{i_{o_\tau}}} \mid spl = (C, A, L); i_{o_\tau} = \overline{1, n_{o_\tau}} \right)_{min}; \left(\forall^{spl} E_{min_{i_{o_E}}} \mid spl = (C, A, L); i_{o_E} = \overline{1, n_{o_E}}} \right)_{min} \right\} \right|,$$

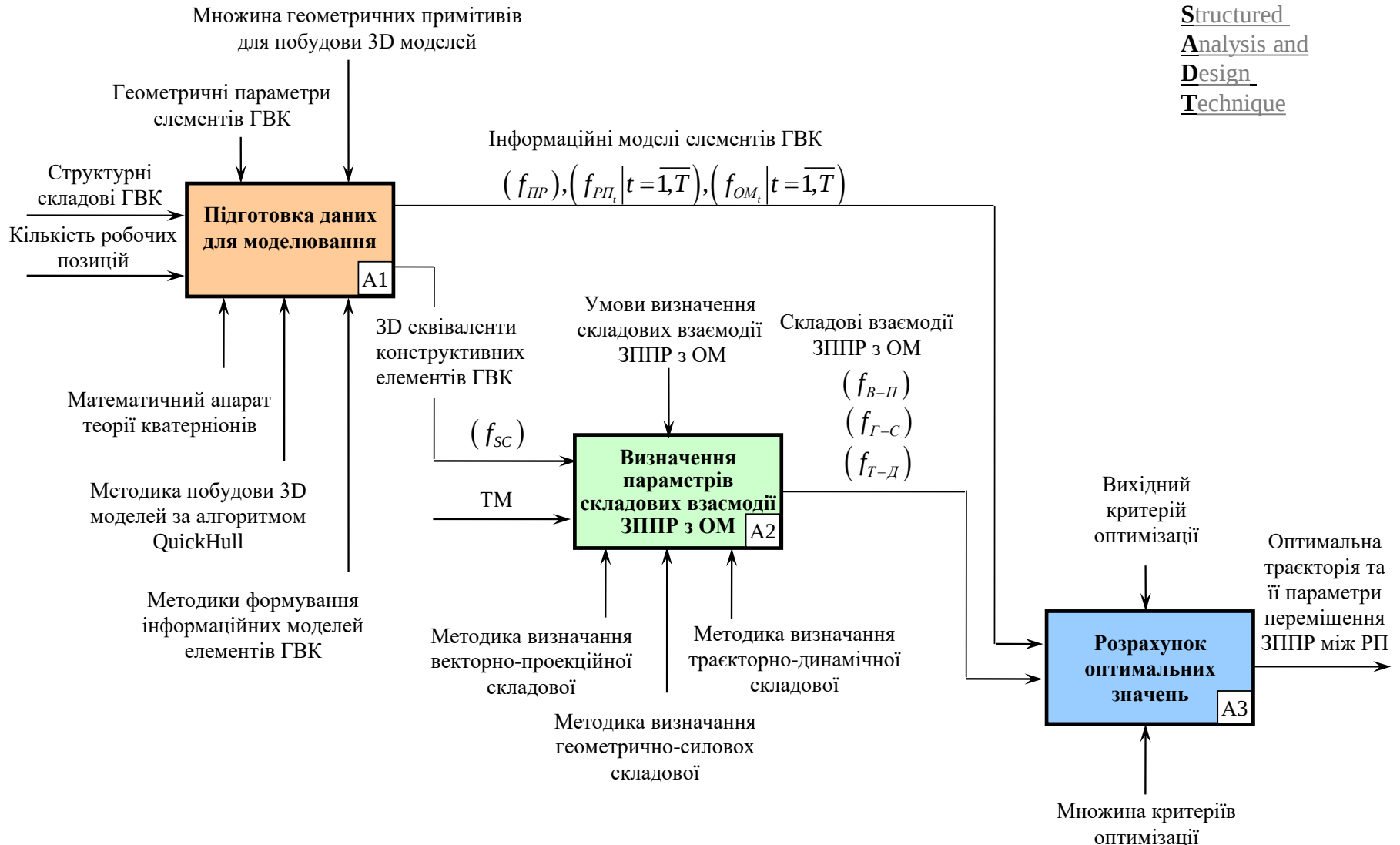
$\langle \mathbf{f}_i \rangle$ – упорядкована множина обчислювальних процедур;
 $(\mathbf{f}_{ZPPP})$ – множина процедур формування ІМ ЗППР;
 $(\mathbf{f}_{MSPR})$ – множина процедур формування ІМ МСПР;
 $(\mathbf{f}_{PP})$ – множина процедур формування ІМ ПР;
 $(\mathbf{f}_{PPPt})$ – множина процедур формування ІМ ПрРП;
 $(\mathbf{f}_{TOPPt})$ – множина процедур формування ІМ ТОРП;

$(\mathbf{f}_{PPt})$ – множина процедур формування ІМ РП;
 $(\mathbf{f}_{OMt})$ – множина процедур формування ІМ ОМ;
 $(\mathbf{f}_{SC})$ – множина процедур формування сцени елементів ГВК;
 $(\mathbf{f}_{B-P}), (\mathbf{f}_{G-C}), (\mathbf{f}_{T-D})$ – множина процедур пошуку значень векторно-проекційної, геометрично-силової, траєкторно-динамічної складових взаємодії ЗППР з ОМ;

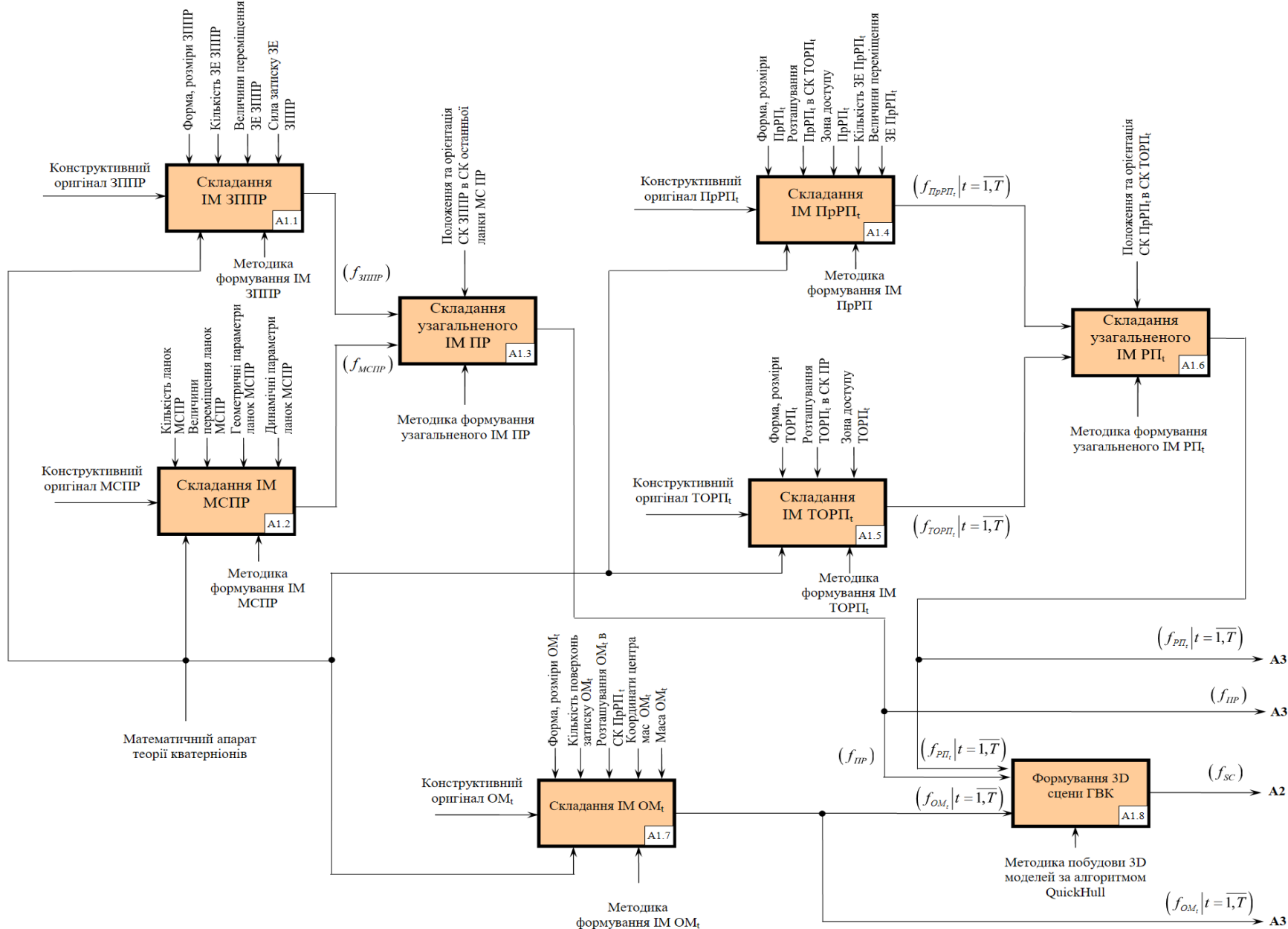
n_{o_τ}, n_{o_E} – кількість аналізованих ситуацій (випадків);
 $({}_{-col} \text{TrSp}_{i_{spl}})$ – множина безколізійних траєкторій, що апроксимовані сплайнами: Cubic, Akima's, Linear;
 $(\mathbf{F}_{i_F})$ – множина процедур визначення параметрів τ, E;
 $(\mathbf{F}_{i_F^*})_{min}$ – множина процедур визначення параметрів τ_{min}, E_{min}

THE SADT-DIAGRAM OF THE RESEARCHING

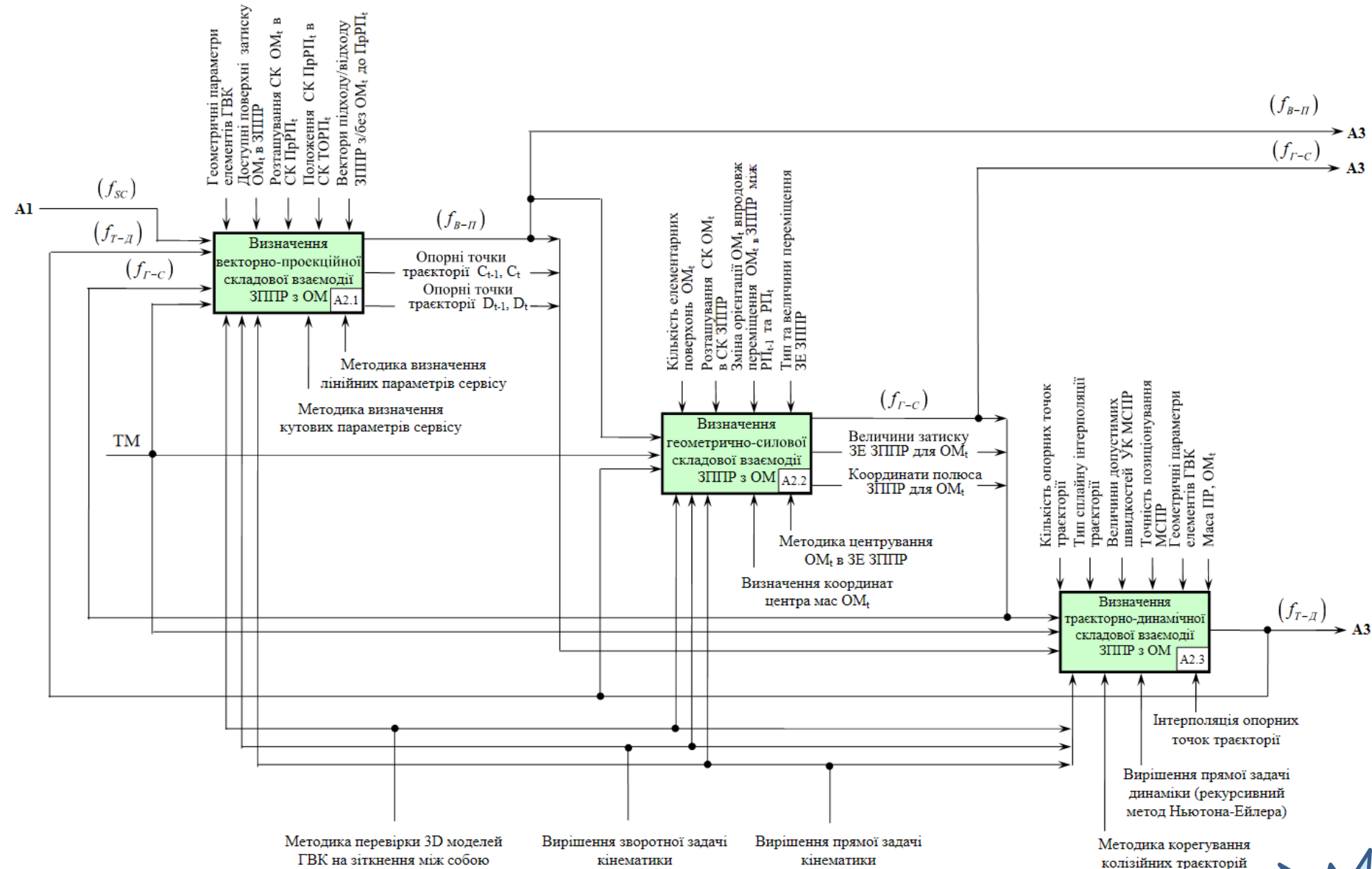
Structured
Analysis and
Design
Technique



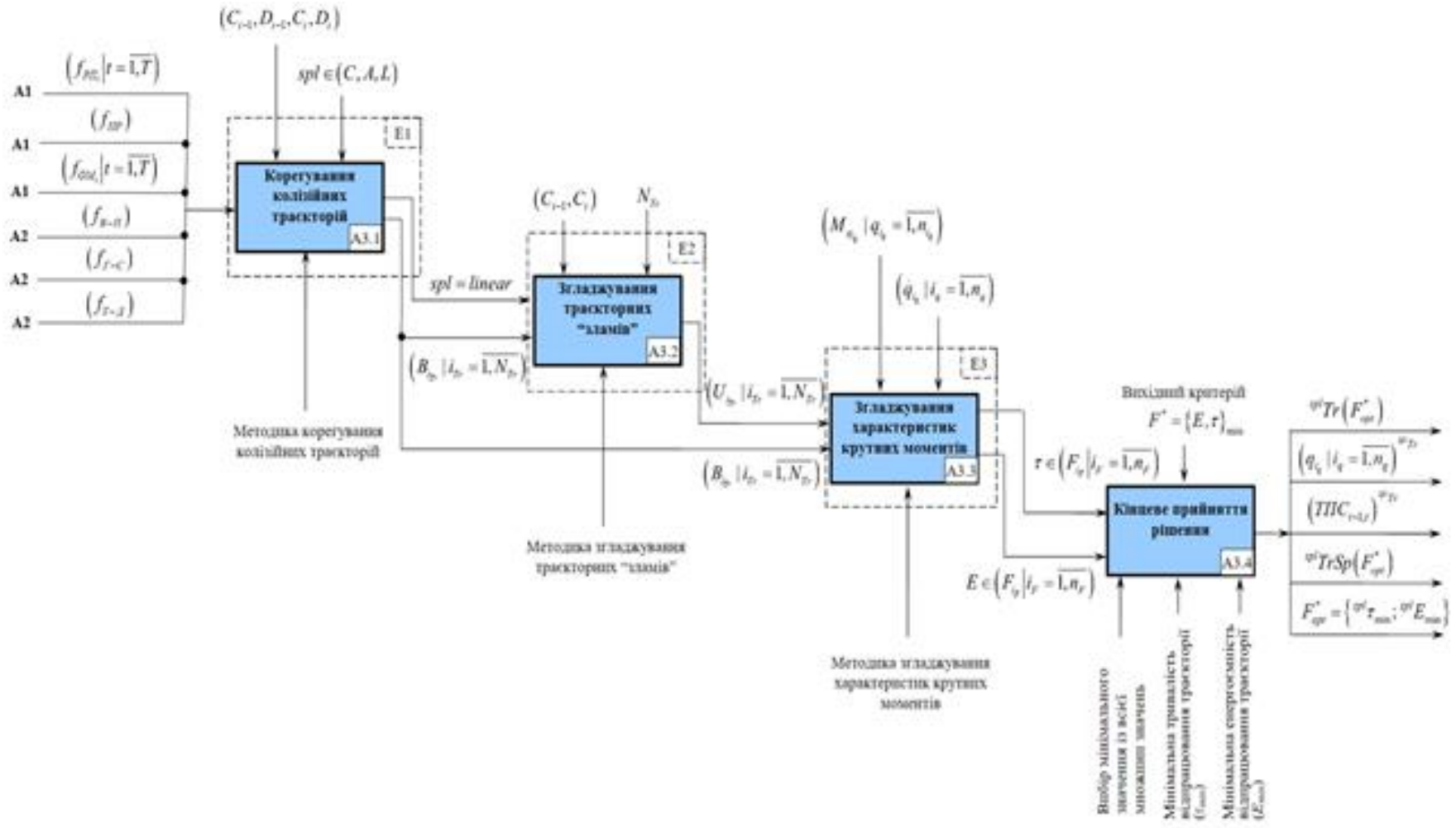
THE SADT-DIAGRAM OF THE A1 BLOCK (see slide 7)



THE SADT-DIAGRAM OF THE A2 BLOCK (see slide 7)

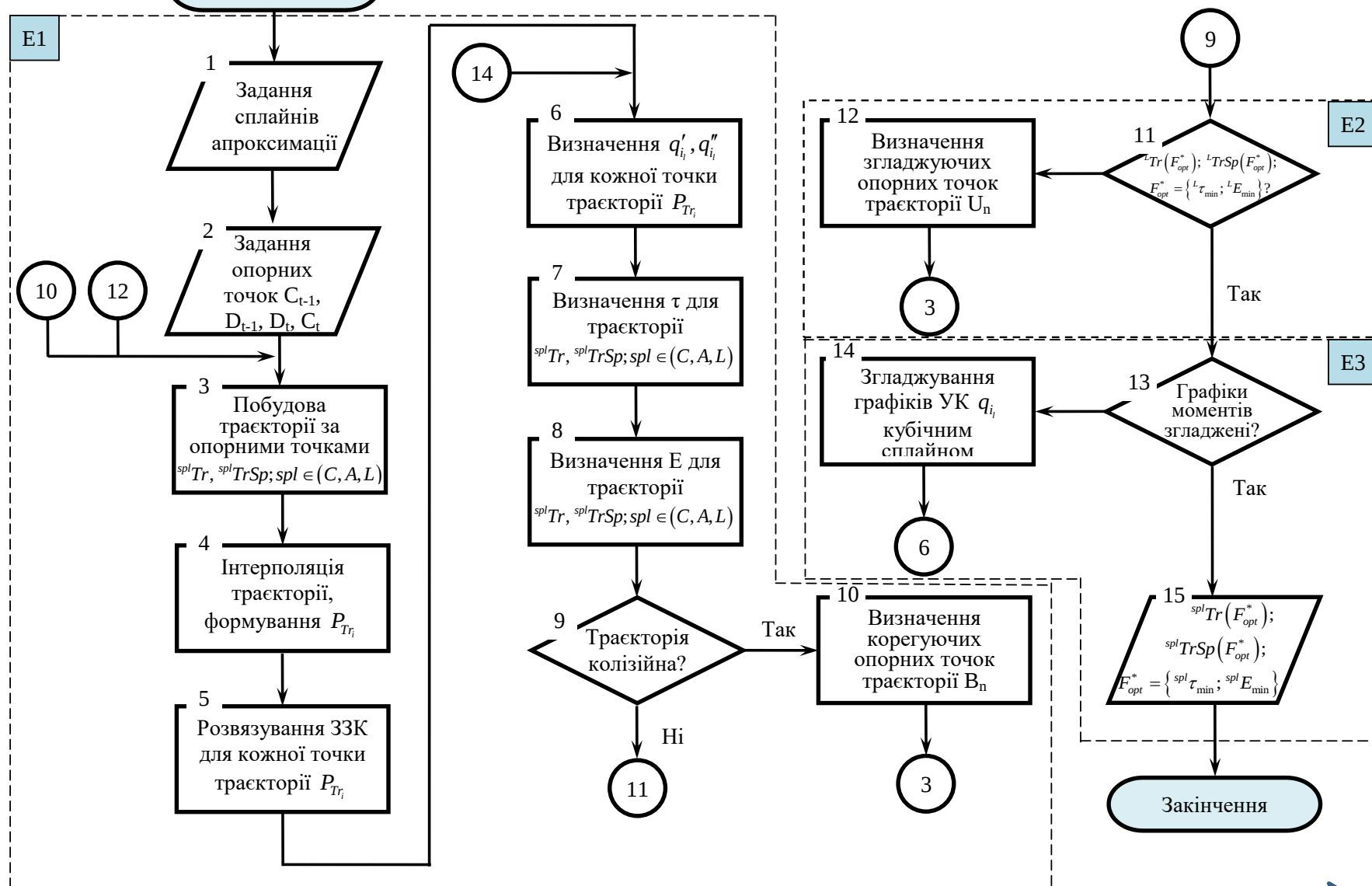


SADT – DIAGRAM OF CALCULATION AND CHOICE OF OPTIMAL TRAJECTORIES VALUES



THE ALGORITHM OF FINDING $\tau_{\min}$ AND $E_{\min}$ CRITERIA, BLOCK A3

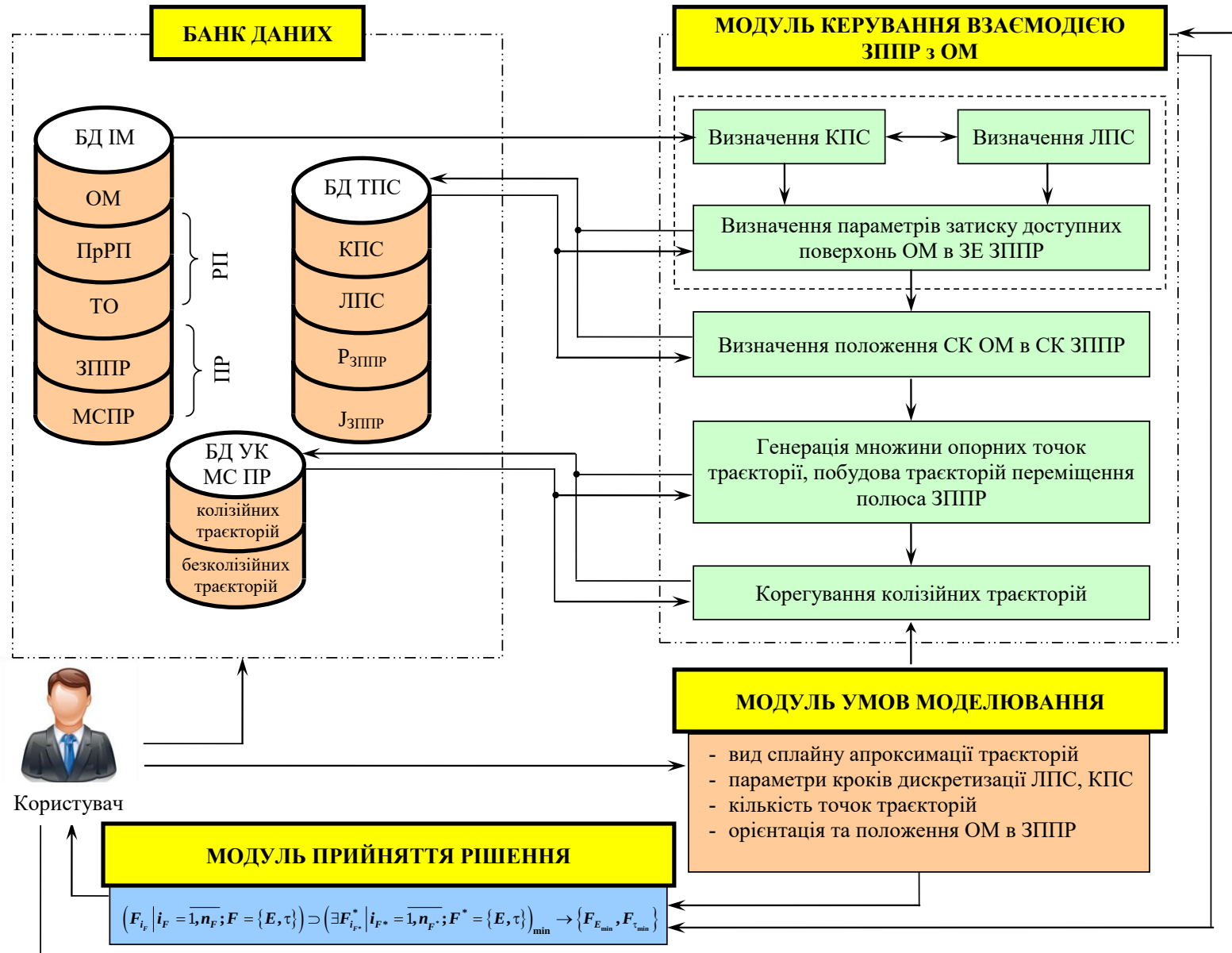
(see slide 7)



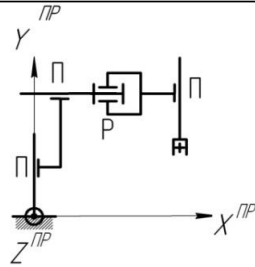
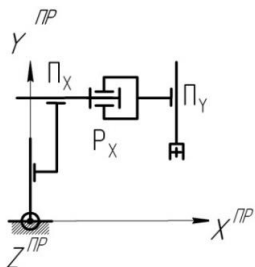
COMPARISON OF THE EXISTING SOFTWARES FOR RESOLVING TASKS RELATED TO GRIPPERS' INTERACTION WITH THE OBJECTS OF MANIPULATION

The analyzed Softs The analyzed characteristics	RobotWorks	V-Rep	RobotMaster	RobotExpert	Dyn-Soft robSim	RoboAnalyzer	ROS	RoboDK	MBS	Robix
Можливість створення 3D-моделі ПР та інших структурних складових ГВК	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Побудова 3D сцени ГВК на основі готових моделей ПР, ОМ, ТО	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Формування траєкторій переміщення ЗППР за опорними точками	+	+	+	+	–	–	+	+	+	+
Offline корегування колізійних траєкторій	–	+	+	+	–	–	+	–	–	+
Можливість перевірки на колізію між елементами ГВК	+	+	+	+	+	–	+	–	–	+
Підготовка інформації для управляючих програм ПР	+	+	+	+	+	–	+	+	+	+
Розробка управляючих програм ПР	+	+	+	+	–	–	+	+	+	–
Програмування ПР	–	+	+	+	–	–	+	+	–	–
Можливість розрахунку часу циклу (швидкодія) траєкторій	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Вирішення прямої задачі кінематики (ПЗК)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Вирішення зворотної задачі кінематики (ЗЗК)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Вирішення прямої задачі динаміки (ПЗД)	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Вирішення зворотної задачі динаміки (ЗЗД)	–	+	+	+	+	+	+	+	+	–
Визначення координат точки затиску ОМ в ЗППР (ЛПС)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Визначення орієнтації ЗППР при затиску ОМ в ЗППР (КПС)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Визначення енергоємності траєкторій	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Апроксимація траєкторій кінцевою множиною сплайнів	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Вибір оптимальної траєкторії	–	–	–	–	–	–	–	–	–	+
Підтримувані операційні системи	Windows	Linux, Mac OS, Windows	Windows	Windows	Windows	Windows	Linux	Linux, Mac OS, Windows	Linux, Mac OS, Windows	Windows
Додаткове програмне забезпечення	Solid Works	–	–	–	3DStudio MAX	–	–	–	MatLab	–
Вартісна складова	300\$ / 1 pc	Free educational license	н/д	н/д	~70\$	–	–	–	н/д	–

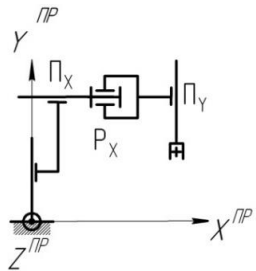
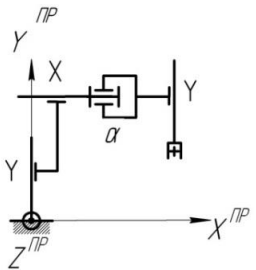
THE PROPOSED STRUCTURE OF DSS FOR AUTOMATED CONTROL OF GRIPPERS' INTERACTION WITH THE OBJECTS OF MANIPULATION



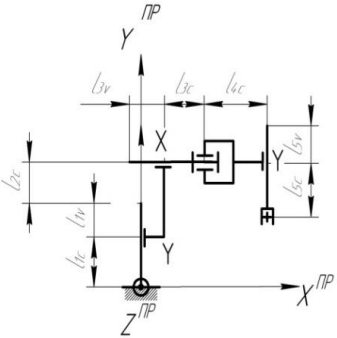
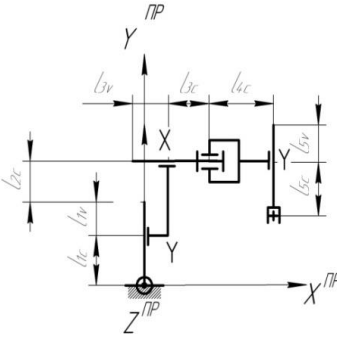
THE EXISTING INFORMATION MODELS OF INDUSTRIAL ROBOTS' MANIPULATION SYSTEMS

Приклад ПР:			Форма подання	Оцінка ФМ	
Кінематична структура	Опис	Коментарі		Переваги	Недоліки
	$P \perp P \parallel R \perp P$	Рухи ланок: – П – прямолінійні; – Р – обертальні. Розташування ланок: – $\parallel$ – паралельне; – $\perp$ – перпендикулярне	літерно-символьна	– Визначає вид руху та взаєморозташування ланок у ФПП	– Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; – не відображає однозначно розташування ланок МС ПР відносно обраної системи координат; – не визначає величини переміщень ланок в СК ПР; – не визначає геометричні параметри ланок МС ПР
	$P_y \perp P_x \parallel R_x \perp P_y$	Рухи ланок: – П – прямолінійні; – Р – обертальні. Розташування ланок: – $\parallel$ – паралельне; – $\perp$ – перпендикулярне; – X, Y, Z – вісі прийнятої системи координат, відносно яких відбувається лінійне переміщення/обертання ланок при ФПП	літерно-символьна	– Визначає вид руху та взаєморозташування ланок у ФПП та відносно обраної системи координат	– Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; – не визначає величини переміщень ланок в СК ПР; – не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; – інформаційна збитковість, що визначається наявністю символів паралельного та перпендикулярного взаєморозташування ланок та осей, відносно яких вони розташовані; – неможливість використання при аналізі кутових переміщень, відмінних від 90°

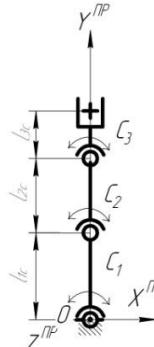
THE EXISTING INFORMATION MODELS OF INDUSTRIAL ROBOTS' MANIPULATION SYSTEMS

	$\Pi_y \Pi_x P_x \Pi_y$	Рухи ланок: – Π – прямолінійні; – P – обертальні. Розташування ланок: – X, Y, Z – вісі прийнятої системи координат, відносно яких відбувається лінійне переміщення/обертання ланок при ФПП	літерно-символьна	– Визначає вид руху та взаєморозташування ланок у ФПП та відносно обраної системи координат	– Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; – не визначає величини переміщень ланок в СК ПР; – не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; – не визначає однозначно розташування ланок МС ПР відносно прийнятої СК
	$Y \rightarrow X \rightarrow \alpha \rightarrow Y$	Переміщення ланок відносно осей прийнятої СК $X^{\text{ПР}}, Y^{\text{ПР}}, Z^{\text{ПР}}$ при ФПП: X, Y, Z – лінійні вздовж одноіменних осей; α, β, γ – обертотів навколо осей $X^{\text{ПР}}, Y^{\text{ПР}}, Z^{\text{ПР}}$ відповідно	літерно-символьна	– Визначає вид та напрям руху та взаєморозташування ланок у ФПП та відносно обраної СК ПР	– Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; – не визначає величини переміщень ланок в СК ПР; – не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; – не визначає однозначно розташування ланок МС ПР відносно прийнятої СК

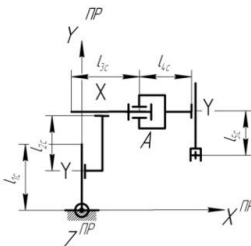
THE EXISTING INFORMATION MODELS OF INDUSTRIAL ROBOTS' MANIPULATION SYSTEMS

	$\langle l_{1c} \ O_{i1} \ \tau_{i1} \ (l_{1iv}) \rangle$	Складові ФО: – l_{1c} – постійний розмір i_1-ої ланки; – O_{i1} – вісь прийнятої СК, вздовж якої розташовується i_1-та ланка; – τ_{i1} – оператор, що визначає напрямок та тип руху наступної ланки відносно попередньої $\tau_{i1} \in \{X, Y, Z, A, B, C\}$; – l_{1iv} – визначає максимальну величину переміщення для i_1-ої ланки	символьна літерно-числова	– Визначає вид руху ланок у ФПП відносно осей прийнятої правої СК, величини переміщень ланок та розрізняє їх; – чітко задає розташування ланок у ФПП	– Не надає повної інформації про функціональні можливості ПР; – не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; – проблеми, що зумовлені використанням кутів Ейлера при відображенні переміщень
	$\langle l_{1c} \ O_{i1} \ \text{type} \ [p_1, p_2] \ \tau_{i1} \ (l_{1iv}) \ S_{i1} \rangle$	Складові ФО: – l_{1c} – постійний розмір i_1-ої ланки; – O_{i1} – вісь прийнятої СК, вздовж якої розташовується i_1-та ланка; – τ_{i1} – оператор, що визначає напрямок та тип руху наступної ланки відносно попередньої $\tau_{i1} \in \{X, Y, Z, A, B, C\}$; – type – тип геометричного примітиву, що описує i_1-ту ланку; – $[p_1, p_2]$ – параметри, що описують розмір геометричного примітиву; – l_{1iv} – визначає максимальну величину переміщення для i_1-ої ланки	символьна літерно-числова	– Визначає вид руху ланок у ФПП відносно осей прийнятої правої СК, величини переміщень ланок та розрізняє їх; – чітко задає розташування ланок у ФПП; – задає типи геометричних примітивів i_1-ої ланки та їх розміри	– Проблеми, що зумовлені використанням кутів Ейлера при відображенні переміщень

THE EXISTING INFORMATION MODELS OF INDUSTRIAL ROBOTS' MANIPULATION SYSTEMS

	$\Omega = \left\{ \begin{matrix} D, d; D_k(\theta), d_k(l, \theta), \\ k = \overline{1, 4} \end{matrix} \right\}$ $D_1(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix},$ $D_2(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix},$ $D_3(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$ $D_4(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$ $d_k(l, \theta) = l e_1, \quad k = \overline{1, 3},$ $e_1 = (1, 0, 0)^T,$ $d_4(l, \theta) = (1 - \theta) e_1$	Складові ФО: – θ – узагальнена координата; – l – довжина ланки; – T – операція транспонування; – Ω – базис ПР; – D – матриця задання положення; – d – матриця переходу до узагальнених координат; – k – кількість осей прийнятої СК; – $D_1(\theta), D_2(\theta), D_3(\theta)$ – матриці положення відносно відповідних осей СК; – $D_4(\theta)$ – одинична матриця	символьна літерно-числова	– Визначає вид руху ланок у ФПП відносно осей прийнятої правої СК; – величини кутових переміщень ланок ; – чітко задає розташування ланок у ФПП; – вирішує пряму та зворотню задачі кінематики; – визначає орієнтацію та підхід Сх ПР	– Чітко визначене ФПП (розташування ланок МС ПР у вигляді прямої лінії) не дає змогу описувати більшість моделей ПР; – не визначає геометричні параметри ланок МС ПР; – проблеми, що зумовлені використанням матриць із розмірностями 3×3; – неможливість опису МС ПР із лінійними переміщеннями; – не відображає можливість одночасного переміщення ланок МС ПР; – не вказує на рухомість та нерухомість ланок
---	---	--	----------------------------------	---	--

THE EXISTING INFORMATION MODELS OF INDUSTRIAL ROBOTS' MANIPULATION SYSTEMS

	$\Phi M = (Y; l_{2c}; X; l_{3c}; BX; l_{4c}; Y; l_{5c}; Q_{двиг}; Q(t); Q_{вих}; F; \varepsilon; q''; \Delta q)$	Складові ФО: – Y, X, Z – лінійні переміщення вздовж відповідних осей прийнятої СК; – BX, BY, BZ – обертіві переміщення навколо відповідних осей СК; – l_{1c} – l_{5c} – постійні розміри ланок; Математичні моделі – Q_{двиг} – привода; – Q(t) – виконавчої механічної системи; – F – зовнішньої силової взаємодії; – ε – перешкод; – q'' – програми руху ПР; – Δq – системи керування	символьна літерно-числова	– Визначає вид руху ланок у ФПП відносно осей прийнятої правої СК; – величини кутових і лінійних переміщень ланок; – чітко задає розташування ланок у ФПП; – вирішує пряму та зворотню задачі кінематики, динаміки; – велика кількість інформаційних математичних моделей, що дозволяє вирішувати різноманітні функціональні задачі реалізованості;	– проблеми, що зумовлені використанням традиційного математичного апарату; – незважаючи на велику кількість інформаційних математичних моделей, в тому числі і перешкод, розглядає ПР не як 3-D модель, а як систему ниткових зв'язків, що не дозволяє точно вирішувати ряд задач функціональної реалізованості, в тому числі задачі динаміки
---	--	---	----------------------------------	---	--

THE EXISTING INFORMATION MODELS OF INDUSTRIAL ROBOTS' MANIPULATION SYSTEMS

ФМ МС ПР(модель) = $(\pm O_1 t_1 [H_1] Q_{1,0} C_{1-2} \pm O_2 t_2 [H_2] Q_{2-1} C_{2-3} \dots$ $\dots \pm O_i t_i [H_i] Q_{i-(i-1)} C_{i-(i-1)} \dots \pm O_n t_n [H_n] Q_{n-(n-1)} C_{n-(n-1)} Gr =$ $= \langle \pm O_i t_i [H_i] Q_{i-(i-1)} C_{i-(i-1)} i = \overline{1, n} \rangle$	Складові ФМ: – $\pm O_i$ – позначення осі в попередньо прийнятій правій системі координат ПР, вздовж якої розташовується i-та ланка МС ПР в ФПП; – H_i – геометричні параметри ланки – $C_{i-(i-1)} \in \{\wedge, \vee, \nabla\}$ – оператор, що вказує на можливість одночасного переміщення/непереміщення ланок;	символьна літерно-числова	– Дозволяє визначити положення та взаємне розташування ланок, їх геометричні і кінематичні параметри, вирішувати задачі досяжності множини точок положення кінцевої ланки МС ПР з/без ОМ у робочому просторі технологічного обладнання з врахуванням конструктивних особливостей обладнання та пристосувань, а також конструктивно-технологічних характеристик МС ПР та ОМ; – представлення лінійних та обертальних переміщень у єдиному форматі	– Придатний для одноруких промислових роботів; – придатний для систем де можливе встановлення ланки у ФПП, тобто паралельно одній із осей абсолютної системи координат робота
--	---	----------------------------------	---	--

DESCRIPTION OF BOUNDARY LINKS MOVEMENTS

Тип переміщення	Приклади ступенів рухомості МС ПР у ФПП	Представлення традиційним математичним апаратом	Представлення математичним апаратом теорії кватерніонів
обертовий A		$I_{i-(i-1)} =$ $= A = +A + -A $ $50 = +20^\circ + -30^\circ $	$Q_{i-(i-1)} =$ $= +R(0,9848; 0,1736; 0; 0)$ $- R(0,9659; -0,2588; 0; 0)$
обертовий B		$I_{i-(i-1)} =$ $= B = +B + -B $ $50 = +20^\circ + -30^\circ $	$Q_{i-(i-1)} =$ $= +R(0,9848; 0; 0,1736; 0)$ $- R(0,9659; 0; -0,2588; 0)$
обертовий C		$I_{i-(i-1)} =$ $= C = +C + -C $ $80 = +45^\circ + -35^\circ $	$Q_{i-(i-1)} =$ $= +R(0,9238; 0; 0; 0,3826)$ $- R(0,9537; 0; 0; -0,3007)$

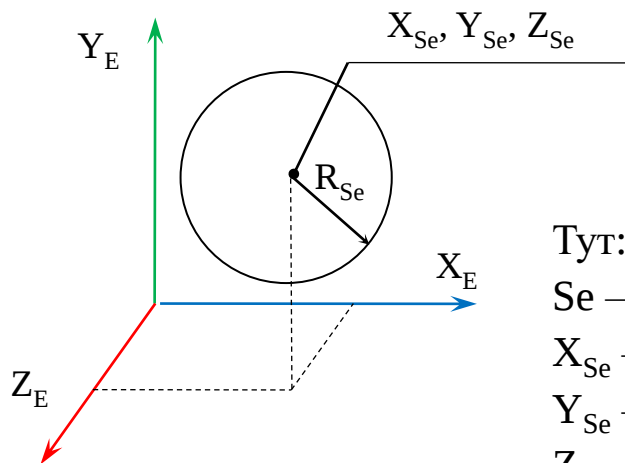
Тип переміщення	Приклади ступенів рухомості МС ПР у ФПП	Представлення традиційним математичним апаратом	Представлення математичним апаратом теорії кватерніонів
лінійний X		$I_{i,v} = X$	$Q_{i-(i-1)} =$ $= L(\sqrt{X^2}; X; 0; 0)$
лінійний Y		$I_{i,v} = Y$	$Q_{i-(i-1)} =$ $= L(\sqrt{Y^2}; 0; Y; 0)$
лінійний Z		$I_{i,v} = Z$	$Q_{i-(i-1)} =$ $= L(\sqrt{Z^2}; 0; 0; Z)$

THE FEATURES OF INFORMATION MODELS OF FLEXIBLE MANUFACTURING CELL COMPONENTS

1. DESCRIPTION AND USING OF THE GEOMETRICAL PRIMITIVES

Послідовність: 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.

Базові розташування ГП в СК елемента (E) ГВК



Опис ГП типу “сфера”:

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

Тут:

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

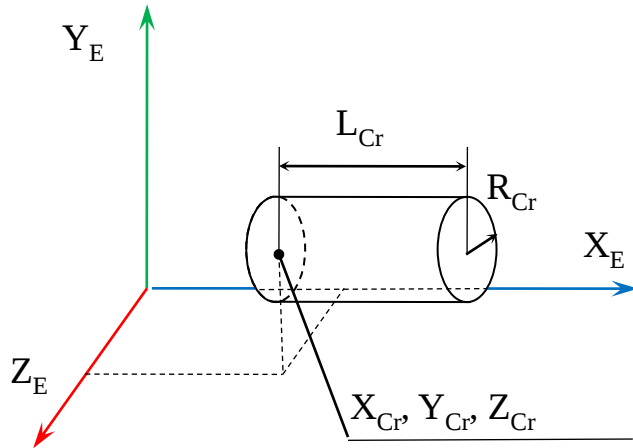
X_{Se} – розташування сфери вздовж осі X в СК елемента E, мм;

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.

1. DESCRIPTION AND USING OF THE GEOMETRICAL PRIMITIVES



Опис ГП типу “циліндр”:

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

Тут:

Cr – ідентифікатор примітиву **Cr (cylinder)** – “циліндр”;

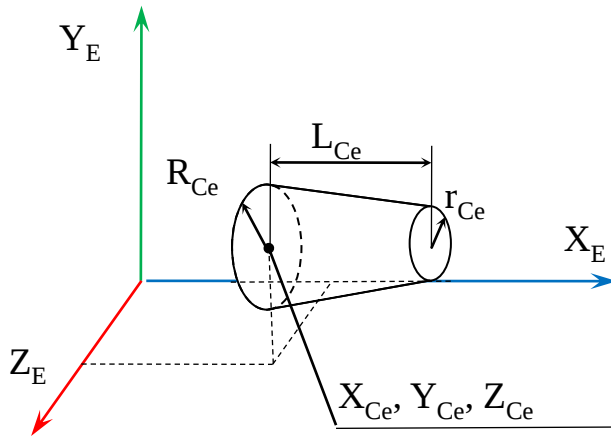
X_{Cr} – розташування циліндра вздовж осі X в СК елемента E , мм;

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}

Тут:

Ce – ідентифікатор примітиву **Ce (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.

1. DESCRIPTION AND USING OF THE GEOMETRICAL PRIMITIVES

Опис ГП типу “паралелепіпед”:

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

Тут:

Pd – ідентифікатор примітиву Pd (parallelepiped) – “паралелепіпед”;

X_{Pd} – розташування паралелепіпеда вздовж осі X в СК елемента E , мм;

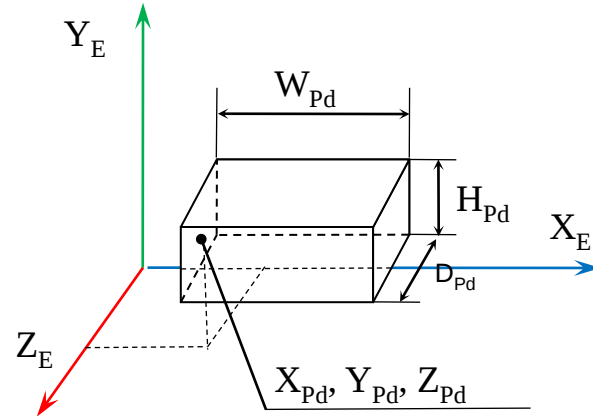
Y_{Pd} – розташування паралелепіпеда вздовж осі Y в СК елемента E , мм;

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”:

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

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;

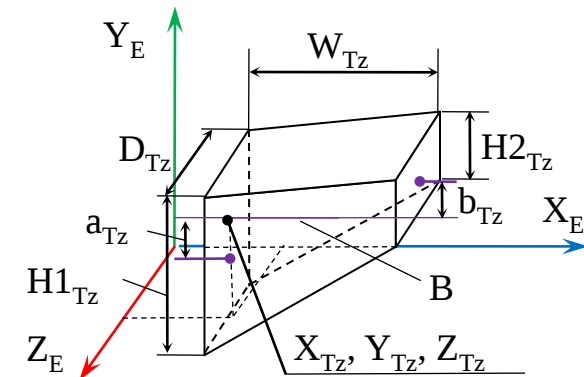
W_{Tz} – ширина трапеції, мм;

$H1_{Tz}$ – 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.

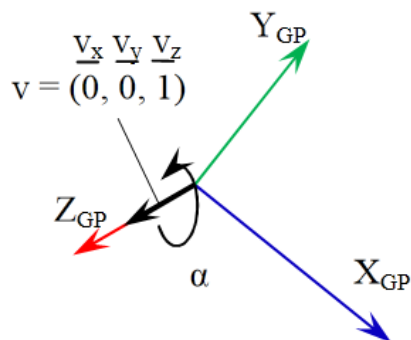


THE FEATURES OF INFORMATION MODELS OF FLEXIBLE MANUFACTURING CELL COMPONENTS

2. DESCRIPTION AND USING OF ORIENTATION QUATERNIONS

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

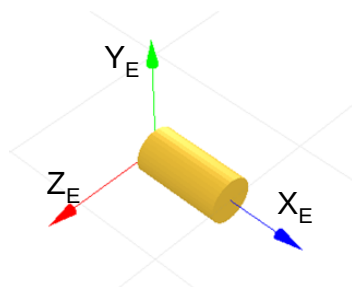
$$Q = [S_Q, X_Q, Y_Q, Z_Q].$$



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

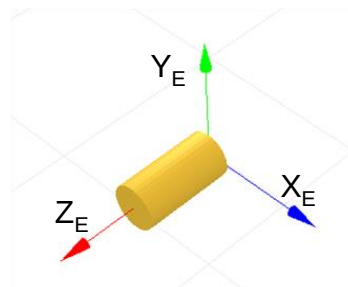
$$= \left(\cos \frac{\alpha}{2}, v_x \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_y \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, v_z \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \right)$$

Приклад опису та відповідної 3D-моделі ГП типу “циліндр”:



CR: 0, 0, 0, 50, 200

без кватерніона орієнтації



CR: 0, 0, 0, 50, 200, 0.7, 0, 0.7, 0

із кватерніоном орієнтації

THE FEATURES OF INFORMATION MODELS

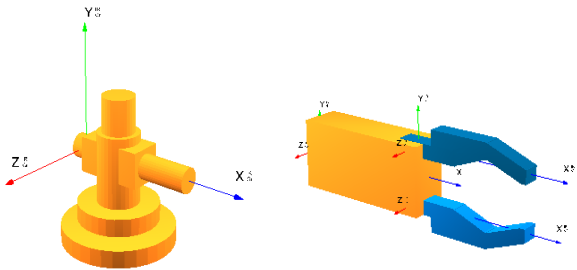
OF FLEXIBLE MANUFACTURING CELL (FMC) COMPONENTS

- **a single mathematical apparatus** in case of IM creation is the theory of quaternions. The description of all components as single semantic units – **quaternions** – owing to these providing a scalar and vector component, allows describing both the motionless structural components, and mobile ones displaying linear and rotary movements. It is especially important for the description of relative movements of mobile links of the handling system, gripper elements, mobile elements of each working post device;
- utilization in the quaternion description of components of geometric primitives allows the **recreation of 3D-models as separate parts of each component** and their arrangement in sequence. It is important in the case of the solution of a number of tasks of technological content, for example, for the determination of the trajectory parameters of the gripper movements in case of technological operations of unloading and loading of each working post;
- including into the information model of the CFR of parameters used for **“connecting” separate cells determined by features of the described component for the display of their ordered sequence**; for example, in the case of the description of the ordered sequence of links of the handling system, gripper, and devices is universal;
- other parameters (weight and speed of the relative movement of links) brought into the IM allow the further **solving of direct and inverse problems of kinematics and dynamics necessary for determining the temporary and dynamic parameters of synthesizable gripper trajectories**, and also the determination of the link control laws for the automatic implementation of the synthesized optimum trajectory of gripper movements.

THE EXISTING GRIPPERS' INFORMATION MODELS

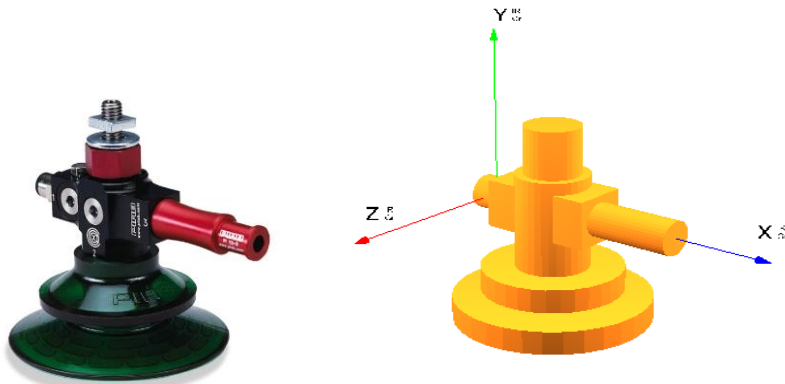
Графічне представлення	Позначення / математичні вирази	Переваги	Недоліки
	1 – фланець; 2 – двигун; 3 – передача; 4 – захватний пристрій	➤ відображає розташування ЗППР в маніпуляційній системі промислового робота	➤ не надає повної інформації про функціональні можливості ЗППР; ➤ відсутність математичних виразів
	ВЛ – вихідна ланка робота; З – захват; О – рух кінематичної пари відносно власної вісі; П_{ло} – поступальне локально-операційне переміщення; /, ⊥, // – з'єднання ланок ↓, ×, – напрямки осей ланок;	➤ компактне представлення; ➤ можливість опису різних механічних конструкцій ЗППР	➤ не надає повної інформації про функціональні можливості ЗППР; ➤ відсутність математичних виразів

THE PROPOSED GRIPPERS' INFORMATION MODELS

Графічне представлення	Переваги	Недоліки	Вимоги щодо ФО ЗППР
	➤ містить інформацію про обмеження та величини переміщень рухомих елементів захватного пристрою; ➤ надає відомості про геометричні розміри захватного пристрою та їх взаємне положення; ➤ придатний для опису багатьох існуючих конструкцій захватних пристроїв	➤ обмеженість набору геометричних примітивів, якими описуються елементи захватного пристрою	• відображення геометричних розмірів елементів ланок маніпуляційних систем та схватів промислових роботів; • наявність інформації про обмеження та величини переміщень рухомих елементів робота; • використання єдиного математичного апарату представлення обертальних та лінійних рухів; • універсальність для більшості існуючих конструкцій маніпуляційних системи та захватних пристроїв промислових роботів; • простота програмної реалізації для вирішення різноманітних технологічних задач АС РМСТ
Позначення / математичні вирази $\text{ФМЗППР(модель)} = \langle \mathbf{P}_{\text{ЗППР}}, \mathbf{CFP}, \left(C \in \langle \mathbf{Gr}_{i_c} \mid i_c = \overline{1, I_c} \rangle \right) \vee \left(\mathbf{V}_{i_v} \in \langle \mathbf{L}_{i_v}, \langle \mathbf{Gr}_{j_{v_i}} \nabla \mathbf{V}_{j_{v_i}} \mid j_{v_i} = \overline{1, J_{v_i}} \rangle \rangle \mid i_v = \overline{1, I_v} \right) \rangle$ $\mathbf{C}$ – група нерухомих елементів конструкції ЗППР, I_c – кількість компонентів групи $\mathbf{C}$; $\mathbf{Gr}_{i_c}$ – геометричний примітив; $\mathbf{V}_{i_v}$ – група рухомих елементів конструкції ЗППР; $\mathbf{V}_{j_{v_i}}$ – опис нової j_v-ої групи $\mathbf{V}$, яка описується в СК групи $\mathbf{V}_{i_v}$, тобто має власну СК, інтервальні обмеження щодо можливих переміщень та відповідний склад елементів; J_{v_i} – кількість компонентів групи $\mathbf{V}_{i_v}$; $\mathbf{L}_{i_v}$ – ідентифікатор обмеження (від англ. <i>Limitation</i> – обмеження), представленого у вигляді кватерніонів. $\mathbf{P}_{\text{Сх}}$ – полюс ЗППР, точка в СК ПР, необхідна для пошуку ТПС. $\mathbf{CFP}$ – додаткові параметри ЗППР, за допомогою яких здійснюється поєднання (інтеграція) ФМ ЗППР з ФМ МС ПР			

EXAMPLES OF THE GRIPPERS' INFORMATION MODELS

Приклад 1. ФО вакуумного ЗППР моделі “VGSTTM3010 BF80P” виробника фірми Piab (Швеція)



Конструкція ЗППР

3D-еквівалент ЗППР

```

ФО ЗППР (VGSTTM3010 BF80P) = {
  CFP[(20, 30, 0)(0,0,0,1)]
  M(0.3)
  C{
    GP:[
      PD: 5, 0, 0, 40, 20, 20;
      CR: -5, 0, 0, 7, 80;
      CR: 25, 15, 0, 10, 20, 0.71, 0, 0, 0.71;
      CR: 25,-45, 0, 13, 60, 0.71, 0, 0, 0.71;
      CR: 25, -35, 0, 25, 10, 0.71, 0, 0, 0.71;
      CR: 25, -48, 0, 35, 10, 0.71, 0, 0, 0.71;
    ]
  }
}
    
```

Приклад 2. ФМ кутового пневматичного ЗППР моделі “LGR 32” з 2-ма ЗЕ фірми Schunk (Німеччина)



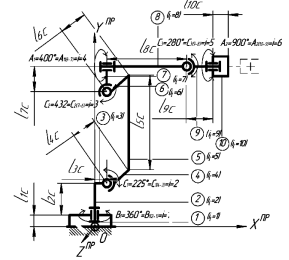
Конструкція ЗППР

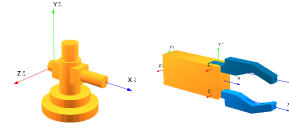
3D-еквівалент ЗППР

```

ФО ЗППР (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;]
  }
}
    
```

THE SCHEME OF FORMING GENERAL INFORMATION MODEL OF INDUSTRIAL ROBOTS

	Складова ФМ: – $\pm O_i$ – позначення осі в попередньо прийнятій правій системі координат ПР, вздовж якої розташовується i-та ланка МС ПР в ФПП; – H_i – геометричні параметри ланки – $C_{i_1, \dots, i_{i-1}} \in \{\wedge, \vee, \nabla\}$ – оператор, що вказує на можливість одночасного переміщення/непереміщення ланок;	символи літерально-числова – Дозволяє визначити положення та взаємне розташування ланок, їх геометричні і кінематичні параметри, вирішувати задачі доскопости множини точок положення кінцевої ланки МС ПР з/без ОМ у робочому просторі технологічного обладнання з врахуванням конструктивних особливостей обладнання та пристосувань, а також конструктивно-технологічних характеристик МС ПР та ОМ; – представлення лінійних та обертованих переміщень у єдиному форматі	– Придатний для одноруких промислових роботів; – придатний для систем де можливе встановлення ланки у ФПП, тобто паралельно одній із осей абсолютної системи координат робота
Інформаційна модель ІМ МС ПР (модель) = $(\pm O_i t_i [H_i] Q_{i-1} C_{i-2} \pm O_{i+1} t_{i+1} [H_{i+1}] Q_{i+2} C_{i+3} \dots \dots \pm O_{i_{i-1}} t_{i_{i-1}} [H_{i_{i-1}}] Q_{i_{i-1}-1} C_{i_{i-1}-2} \pm O_{i_{i-1}+1} t_{i_{i-1}+1} [H_{i_{i-1}+1}] Q_{i_{i-1}+2} C_{i_{i-1}+3} \dots) Gr =$ $= (\pm O_i t_i [H_i] Q_{i-1} C_{i-2} \pm O_{i+1} t_{i+1} [H_{i+1}] Q_{i+2} C_{i+3} \dots) i_1 = \overline{1, n_1}$			

Графічне представлення	Переваги	Недоліки	Вимоги щодо ФО ЗППР
	➢ містить інформацію про обмеження та величини переміщень рухомих елементів захватного пристрою; ➢ надає відомості про геометричні розміри захватного пристрою та їх взаємне положення; ➢ придатний для опису багатьох існуючих конструкцій захватних пристроїв	➢ обмеженість набору геометричних примітивів, якими описуються елементи захватного пристрою	• відображення розмірів елементів ланок маніпуляційних систем та схватів промислових роботів; • наявність інформації про обмеження та величини переміщень рухомих елементів робота; • використання єдиного математичного апарату представлення обертованих та лінійних рухів; • універсальність для більшості існуючих конструкцій маніпуляційних систем та захватних пристроїв промислових роботів; • простота програмної реалізації для вирішення різноманітних технічних задач АС РМСТ
Позначення / математичні вирази ІМЗППР (модель) = $\langle P_{\text{мппр}}, CFP, (C \in \langle Gr_k i_k = \overline{1, I_k} \rangle) \vee \vee (V_{i_k} \in \langle L_{i_k}, \langle Gr_{k_n} \nabla V_{k_n} j_{k_n} = \overline{1, J_{k_n}} \rangle i_k = \overline{1, I_k} \rangle \rangle$ C – група нерухомих елементів конструкції ЗППР, I_k – кількість компонентів групи C; Gr_k – геометричний примітив; V_{i_k} – група рухомих елементів конструкції ЗППР; V_{k_n} – опис нової j-ої групи V, яка описується в СК групи V_{i_k}, тобто має власну СК, інтервальні обмеження щодо можливих переміщень та відповідний склад елементів; J_{k_n} – кількість компонентів групи V_{i_k}; L_{i_k} – ідентифікатор обмеження (від англ. <i>Limitation</i> – обмеження), представленого у вигляді кватерніона. $P_{\text{сх}}$ – полюс ЗППР, точка в СК ПР, необхідна для пошуку ТПС. CFP – додаткові параметри ЗППР, за допомогою яких здійснюється поєднання (інтеграція) ФМ ЗППР з ФМ МС ПР			

MS's IM

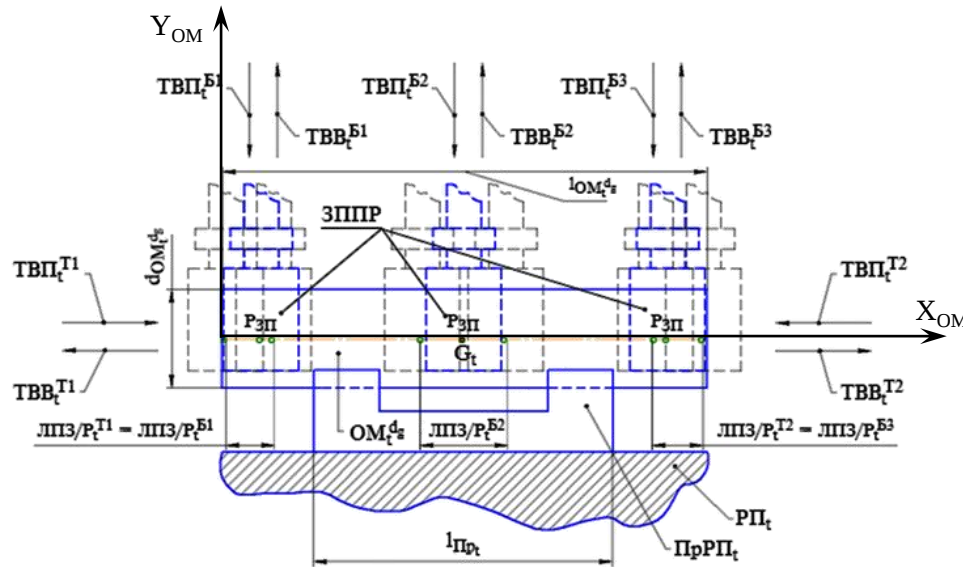
Gr's IM

=

$$IR'sIM \langle MS's IM \rangle \langle Gr's IM \rangle =$$

$$= \langle \pm O_{i_1} t_{i_1} [H_{i_1}] Q_{i_1-(i_1-1)} C_{i_1-(i_1+1)} | i_1 = \overline{1, n_1} \rangle \langle P_{IR'sIM}, CFP, (C) \vee (V_{i_v} | i_v = \overline{1, I_v}) \rangle$$

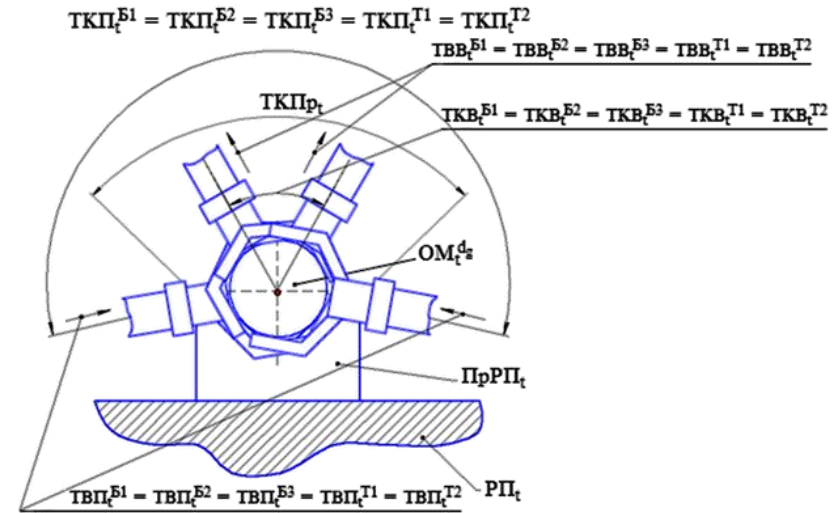
THE VECTOR-PROJECTION (V-P) COMPONENT OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



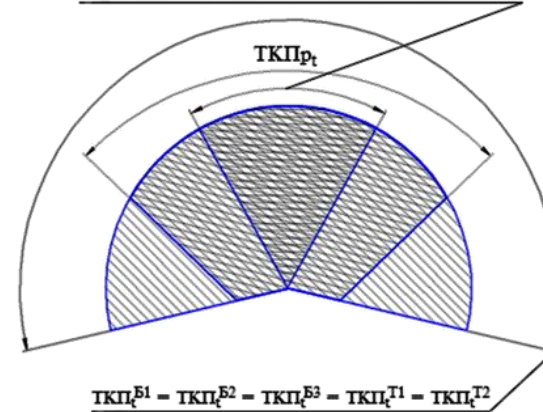
$ПрРП_t$ — пристосування t -ої робочої позиції;
 $РП_t$ — t -та робоча позиція;
 $ОМ_t^{d_s}$ — d -ий об'єкт маніпулювання g -ої групи;
 $ЗППР$ — захватний пристрій промислового робота;

G_t — центр мас $ОМ_t^{d_s}$;
 $Р_{3П}$ — полюс ЗП;

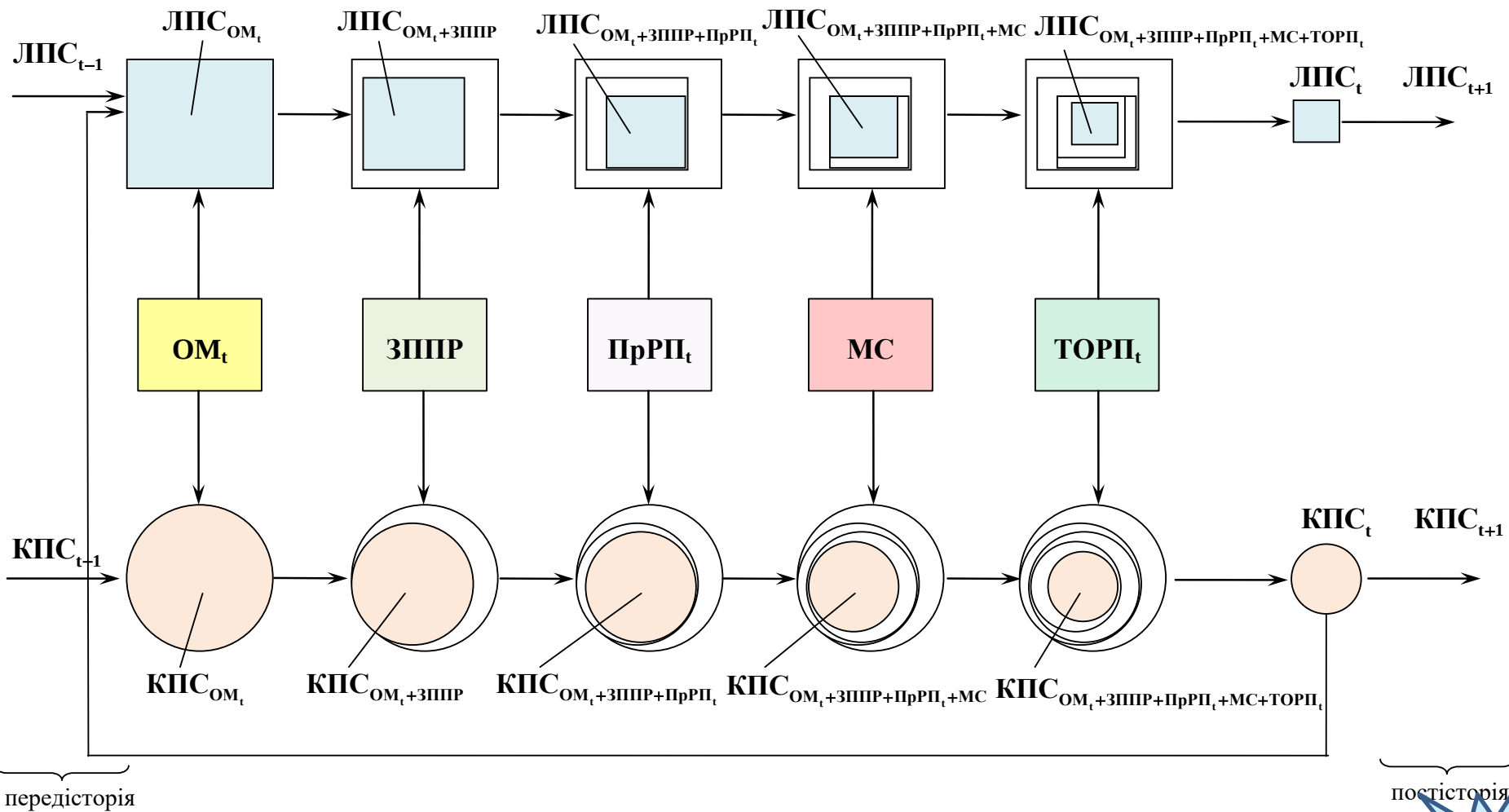
$ЛПЗ/Р_t$ — лінійні параметри затеску/розписку;
 $ТВВ_t$ — технологічний вектор відходу;
 $ТВП_t$ — технологічний вектор підходу;
 $ТКП_t$ — технологічний кут підходу;
 $ТКВ_t$ — технологічний кут відходу;
 $ТКП_{Pr_t}$ — технологічний кут пристосування t -ої робочої позиції;



$$ТКВ_t^{B1} = ТКВ_t^{B2} = ТКВ_t^{B3} = ТКВ_t^{T1} = ТКВ_t^{T2}$$



THE SIMPLIFIED SCHEME OF CALCULATION SEQUENCE OF ANGULAR SERVICE PARAMETERS (ASP) AND LINEAR SERVICE PARAMETERS (LSP)

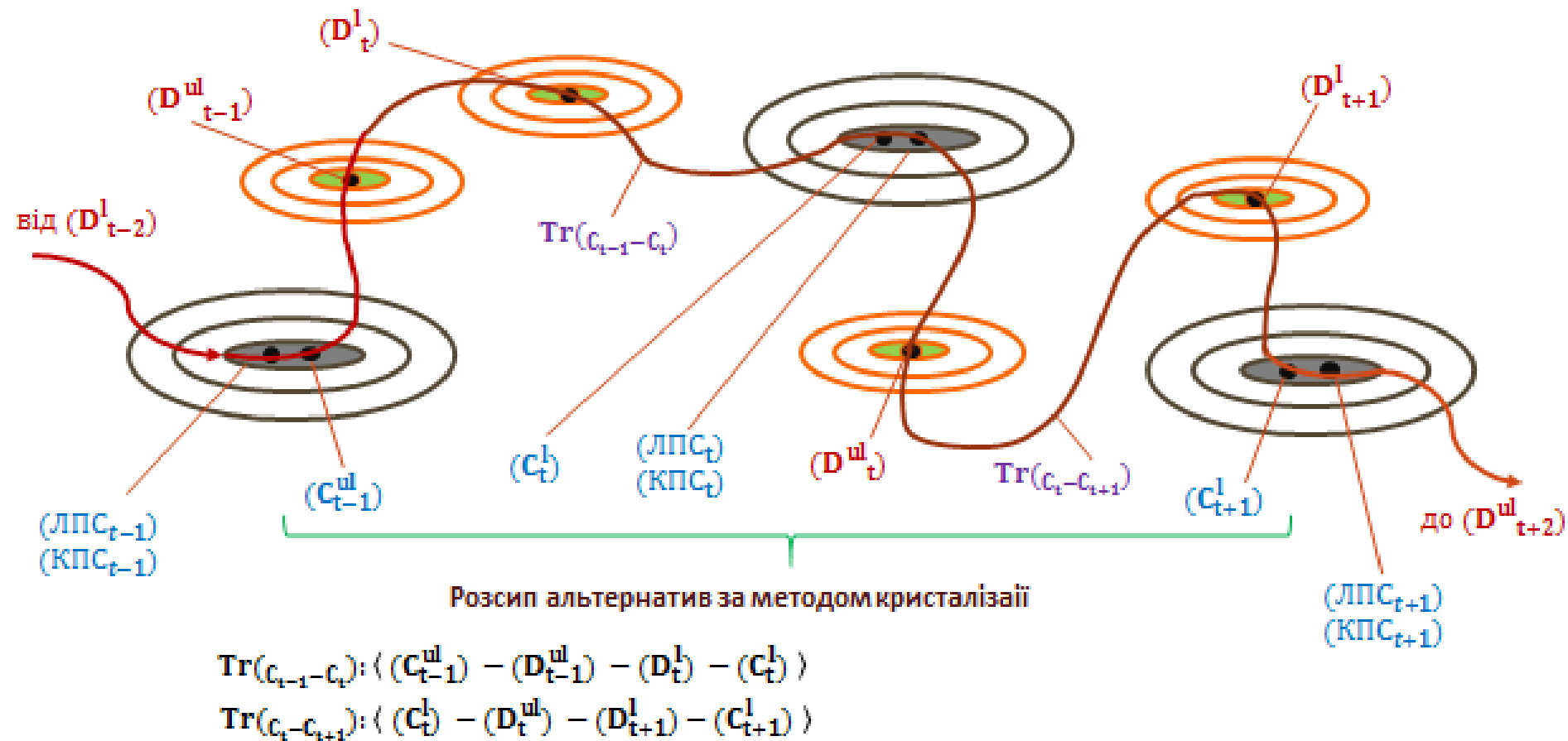


THE MAIN CONTENT OF THE CRYSTALIZATION OF ALTERNATIVES FIELD METHOD

Сутність методу кристалізації, в тому числі кристалізації розсипу альтернатив, полягає у вивченні і використанні метаввристик, закладених в природних механізмах прийняття рішень. У роботі поряд з метаввристками, на яких побудовані ройові алгоритми, використовується метавристика, яка враховує тенденцію до використання альтернатив (варіантів компонентів) з найкращих знайдених рішень. В процесі еволюційної колективної адаптації методами дискримінантного аналізу формуються оцінки пристосованості альтернатив. Пристосованість альтернатив розглядається як ймовірність її використання в формованому рішенні.

Сукупність даних про альтернативи та їх оцінок складає розсип альтернатив. Дискримінантний аналіз альтернатив в процесі еволюційної колективної адаптації названий за аналогією з процесами виокремлення об'єктів (формування кристалів) *кристалізацією*. Іншими словами, в процесі еволюційної колективної адаптації проводиться вибирання з множини варіантів найбільш пристосованих альтернатив. Звідси назва методу оптимізації - метод кристалізації розсипів альтернатив (КРА) (англ. Crystallization of Alternatives Field (CAF)).

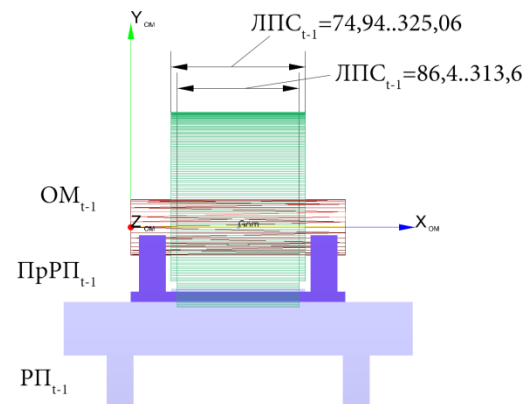
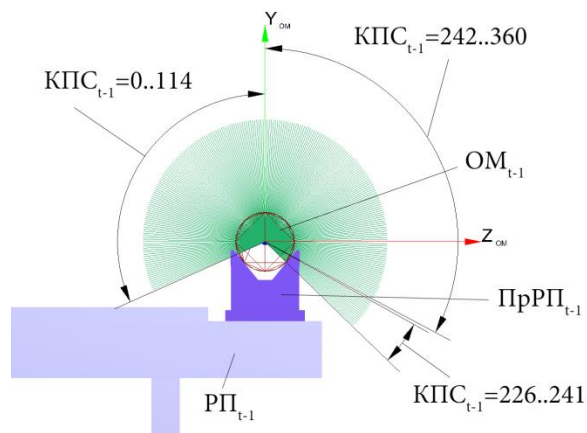
THE GRAPHIC INTERPRETATION OF THE CAF METHOD IN COMPLEX OF THE CONTENT OF THE SOLUTED TASKS



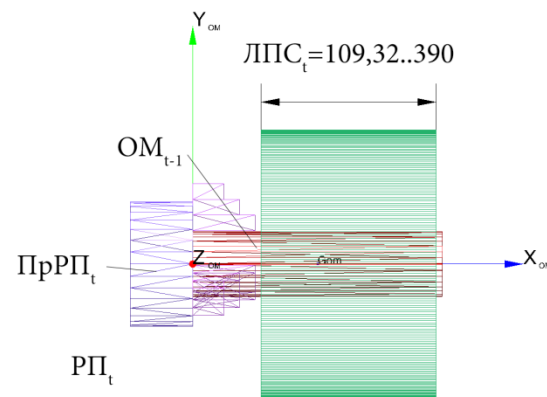
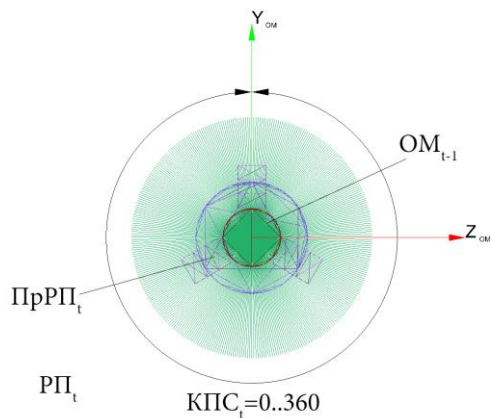
THE ASP and LSP

(the examples for cylindric object with parameters OM
 $\varnothing = 52\text{mm}$, $L = 400\text{ mm}$)

Unloading WP_{t-1}



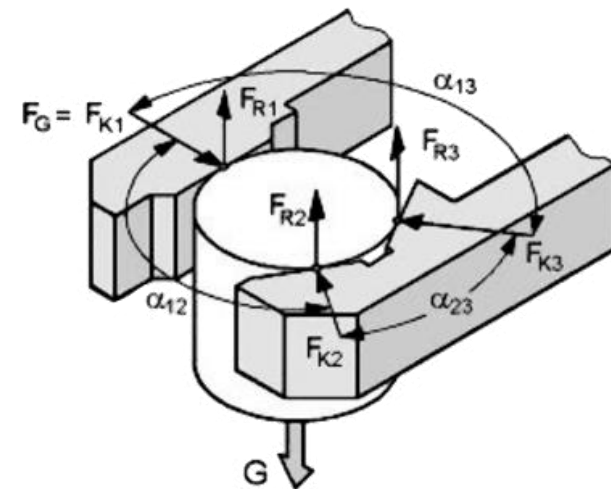
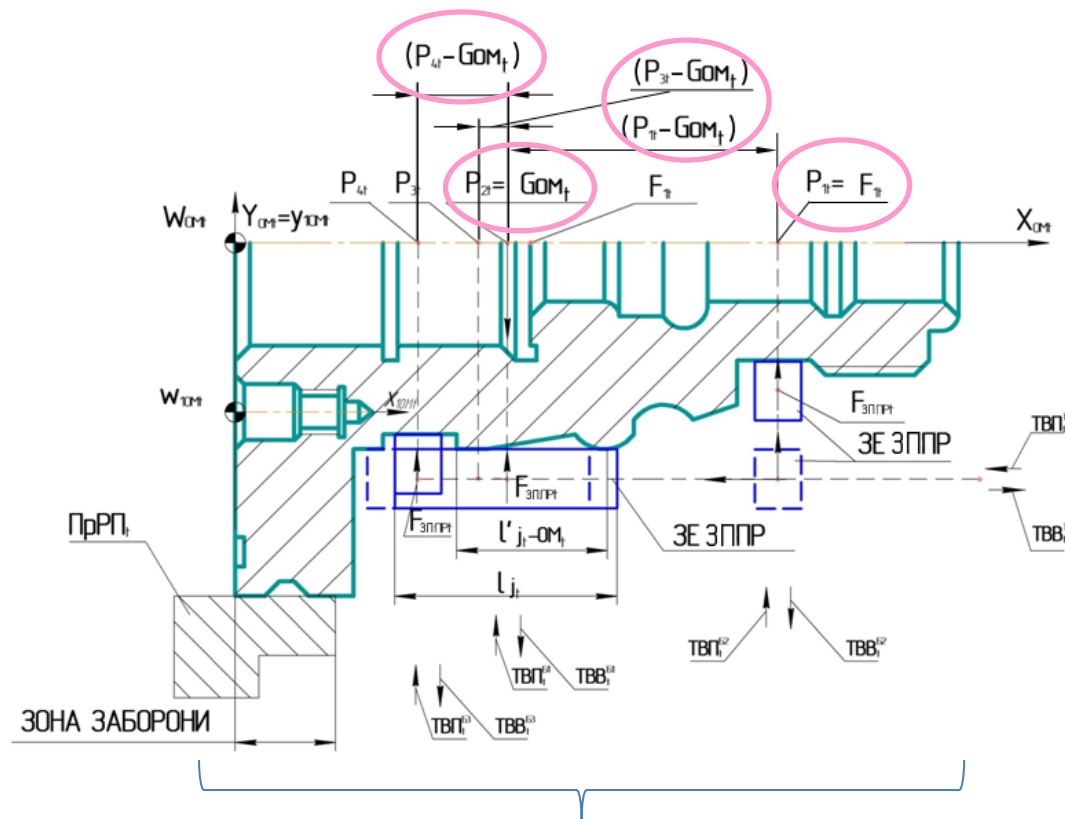
Loading WP_t



The Angle Service Parameters
 ASP_{t-1}, ASP_t

The Linear Service Parameters
 LSP_{t-1}, LSP_t

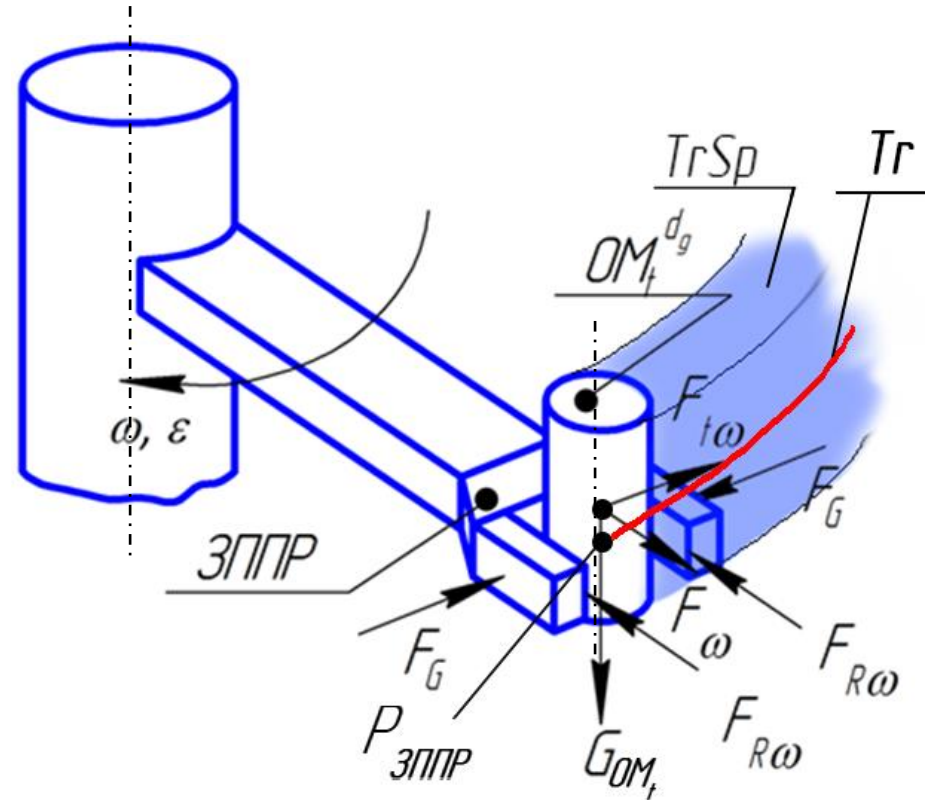
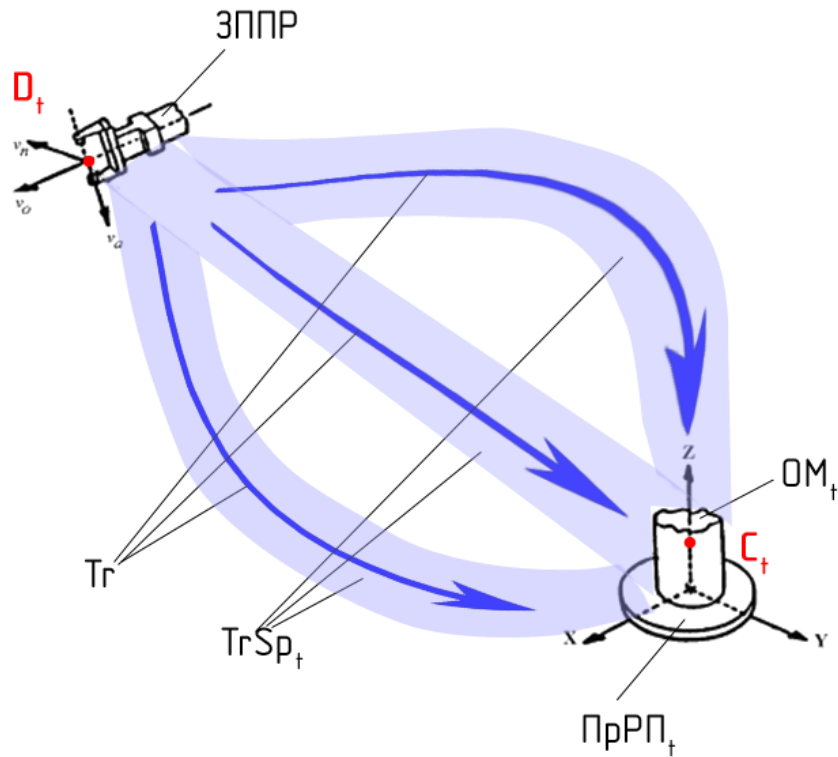
THE GEOMETRICALLY-FORCE (G-F) COMPONENT OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



$P_{3ППР} - G_{OM_t}, J_{3ППР}$
 $ЛПС_{P_{3ППР} - G_{OM_t}}, КПС_{P_{3ППР} - G_{OM_t}}$
 $ЛПС_{J_{3ППР}}, КПС_{J_{3ППР}}$

P – полюс захватного пристрою;
 F_G – сила затиску затискного элемента ЗППР;
 F_K – тиск (контактна сила) на ОМ;
 F_R – сила тертя; G – сила тяжіння;

THE TRAJECTORY-DYNAMIC (T-D) COMPONENT OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



Tr_t – траєкторія переміщення ЗППР до/від $ОМ_t$;

$TrSp_t$ – траєкторний простір переміщення ЗППР з/без $ОМ_t$;

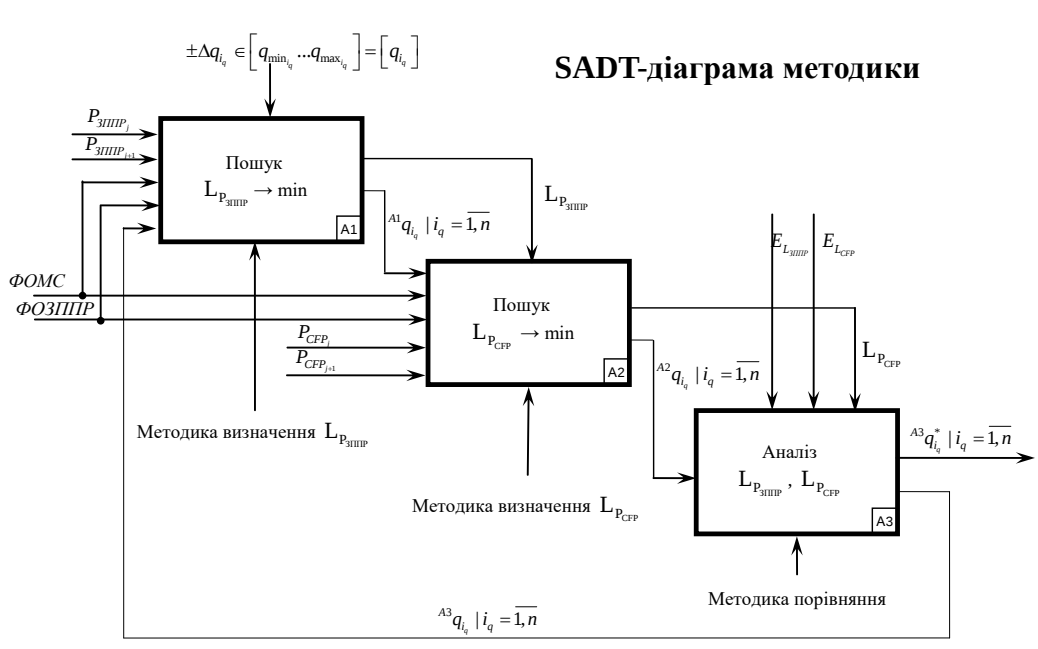
ω, ε – кутові швидкість та прискорення ланок МСПР;

$G_{ОМ_t}$ – сила тяжіння, що діє на $ОМ_t$;

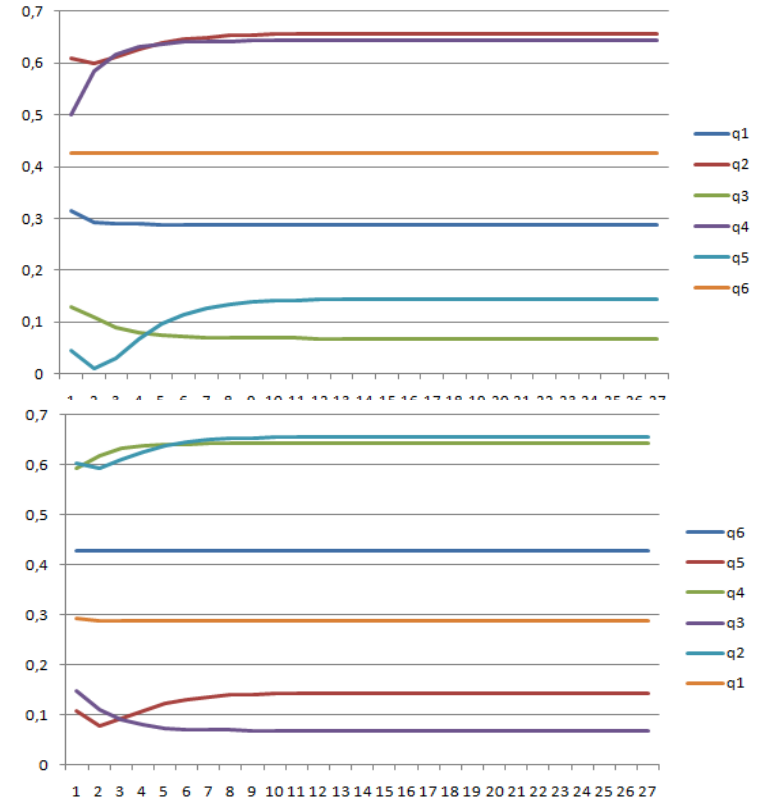
F_G – сила затиску $ОМ_t$ в ЗППР ;

$F_{R\omega}$ – осьова сила тертя; F_ω – відцентрова сила; $F_{t\omega}$ – сила інерції

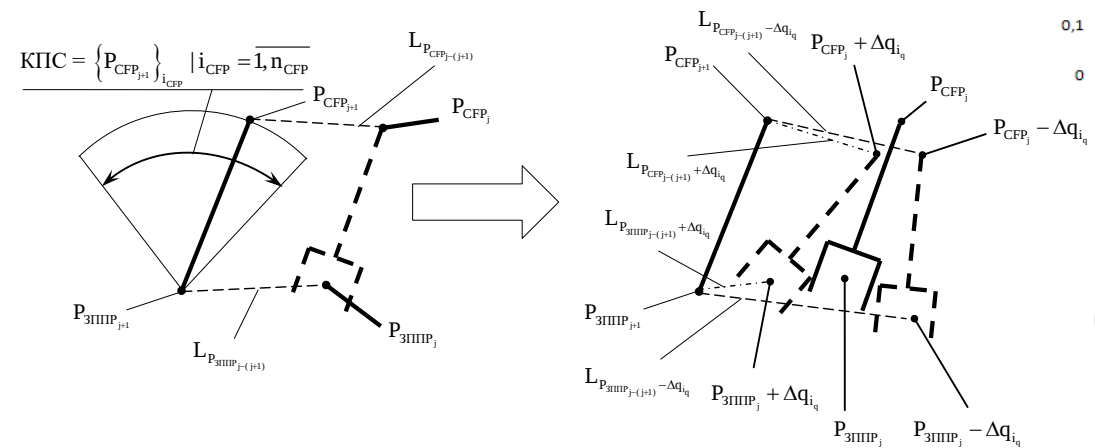
THE PROPOSED METHOD OF INVERSE KINEMATICS TASKS RESOLVING



Приклад зміни локального часу кожної УК МС впродовж циклу розв'язування 33К для ПР мод. KUKA KR-30



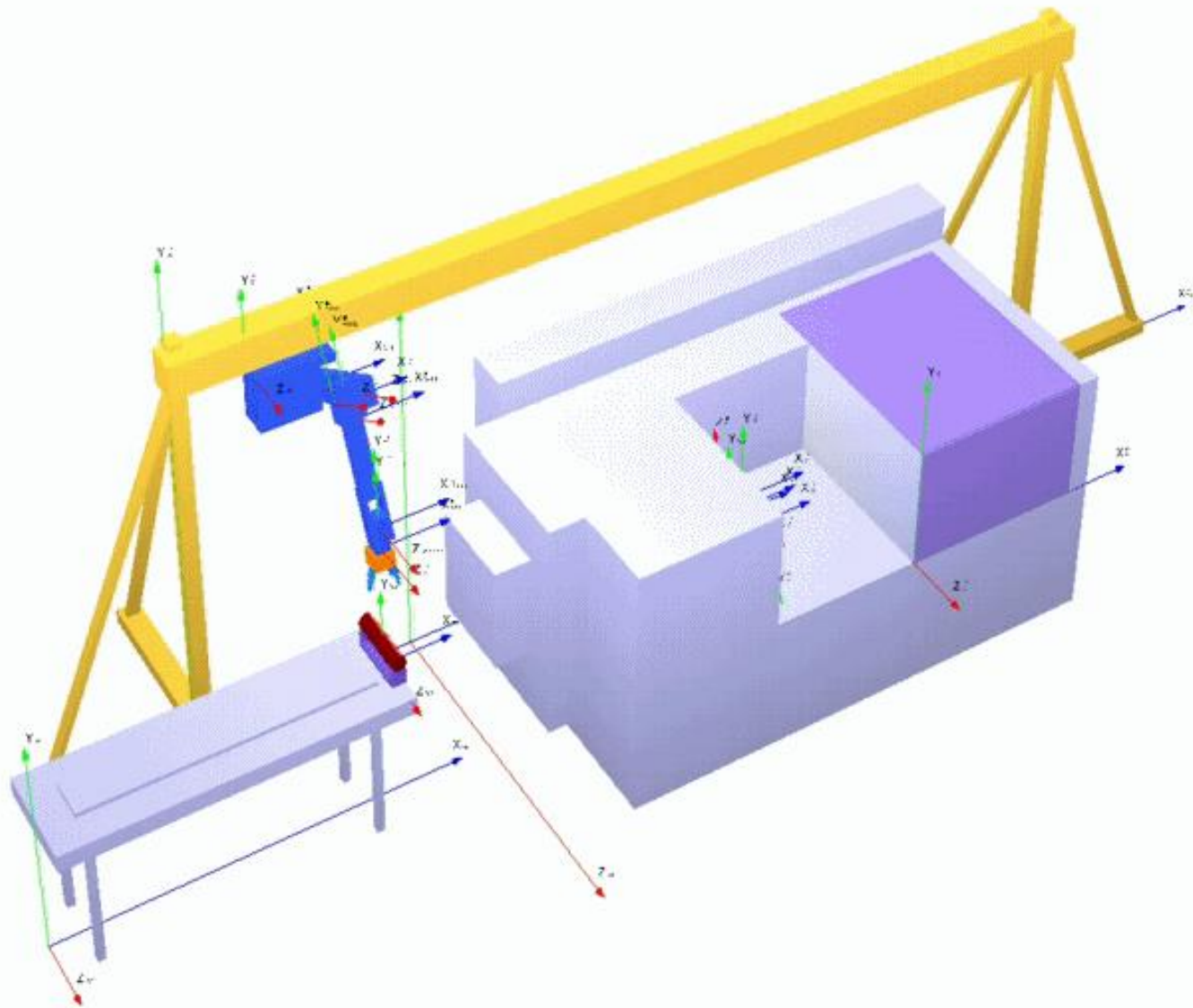
Ілюстрація генерації координат точки Pcx при зміні УК



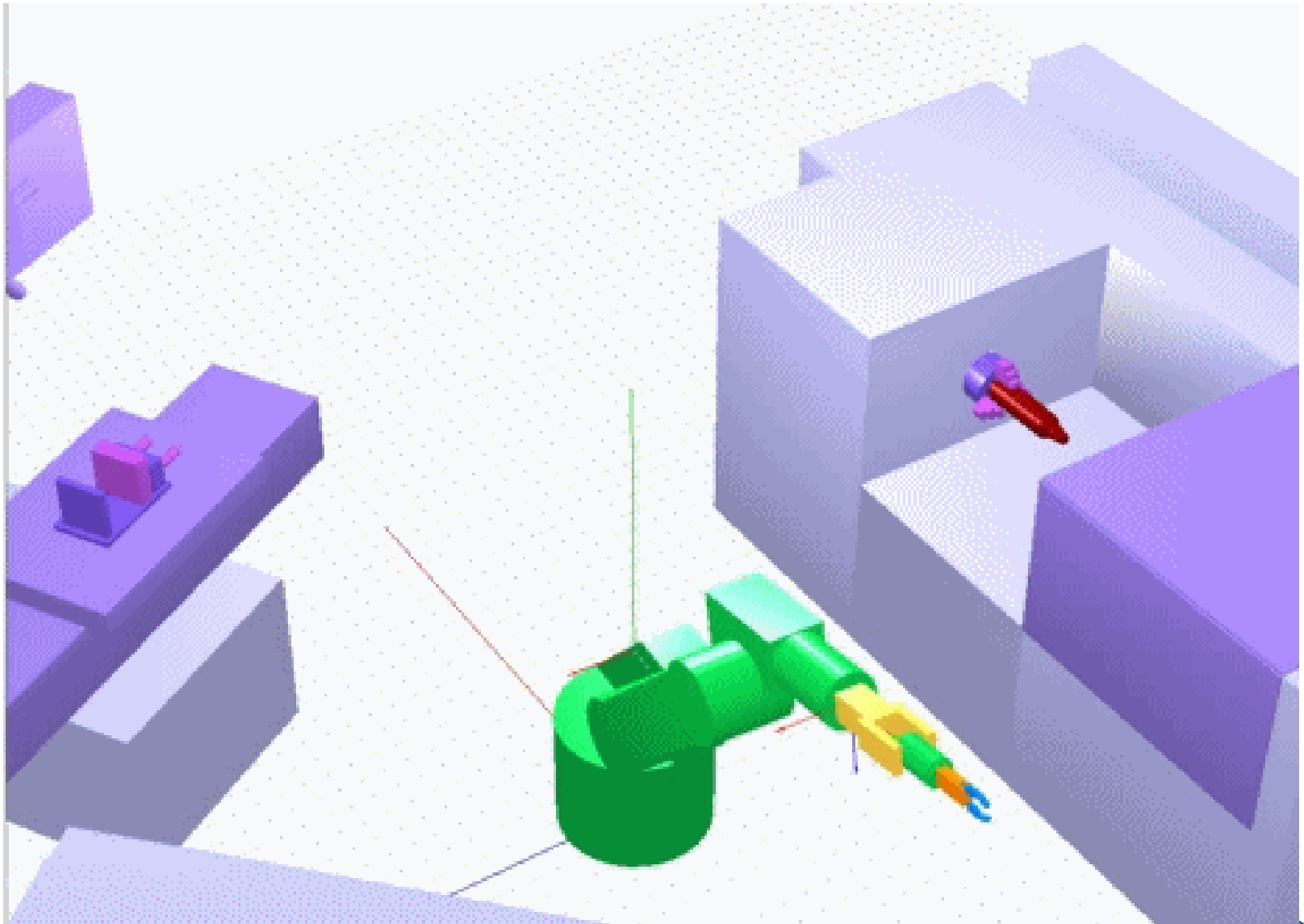
Умова порівнянь:

$$\left(L \left(P_{CFP_j} - P_{CFP_{j+1}} \right) < E_{CFP} \right) \wedge \left(L \left(P_{Cx_j} - P_{Cx_{j+1}} \right) < E_{Gr} \right)$$

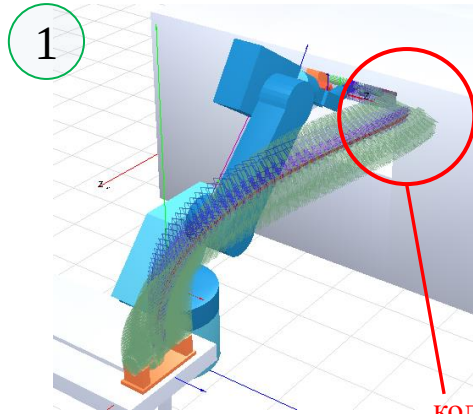
THE EXAMPLE OF THE GENERATED TRAJECTORY REALIZATION BY DEVELOPED "ROBIX" SOFTWARE



THE EXAMPLE OF GENERATED TRAJECTORY REALIZATION BY DEVELOPED "ROBIX" SOFTWARE



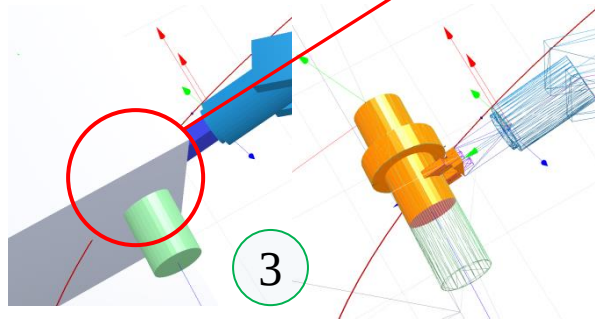
THE PROPOSED METHOD OF COLLISIONAL TRAJECTORIES CORRECTION



1. Побудова за опорними точками C_{t-1} , D_{t-1} , D_t , C_t базової (корегованої) *cubic-spline*-траєкторії

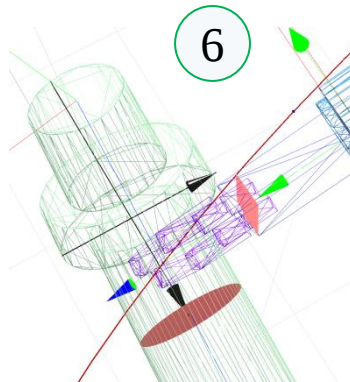
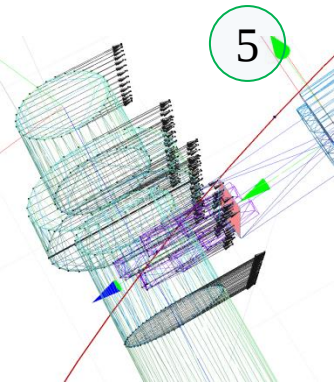
2. Визначення глибини проникнення елементів ТРК в перепону.

3. Формування симплексу перетину елементів ТРК з перепорою.



4. Перебір всіх граней симплексу перетину та перевірка щодо належності до площин граней перепони.

5. Проекція кожної вершини симплексу перетину на відповідну площину.

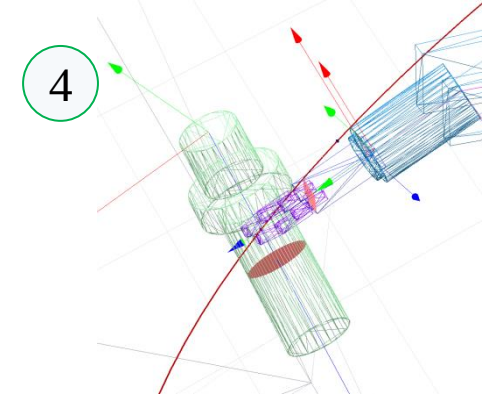
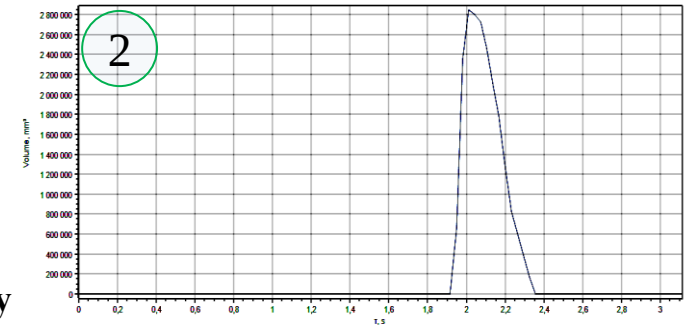


6. Визначення довжин відрізків між вершинами симплексу перетину та їх проекціями.

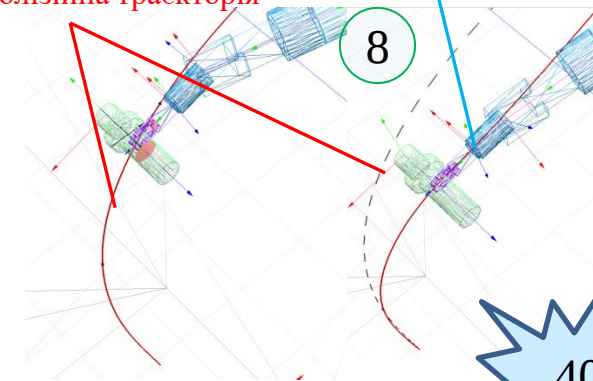
7. Визначення найбільшого значення довжини зміщення.

8. Переміщення полюса ЗППР на отримані величини зміщення та формування нової траєкторії із проміжними точками В.

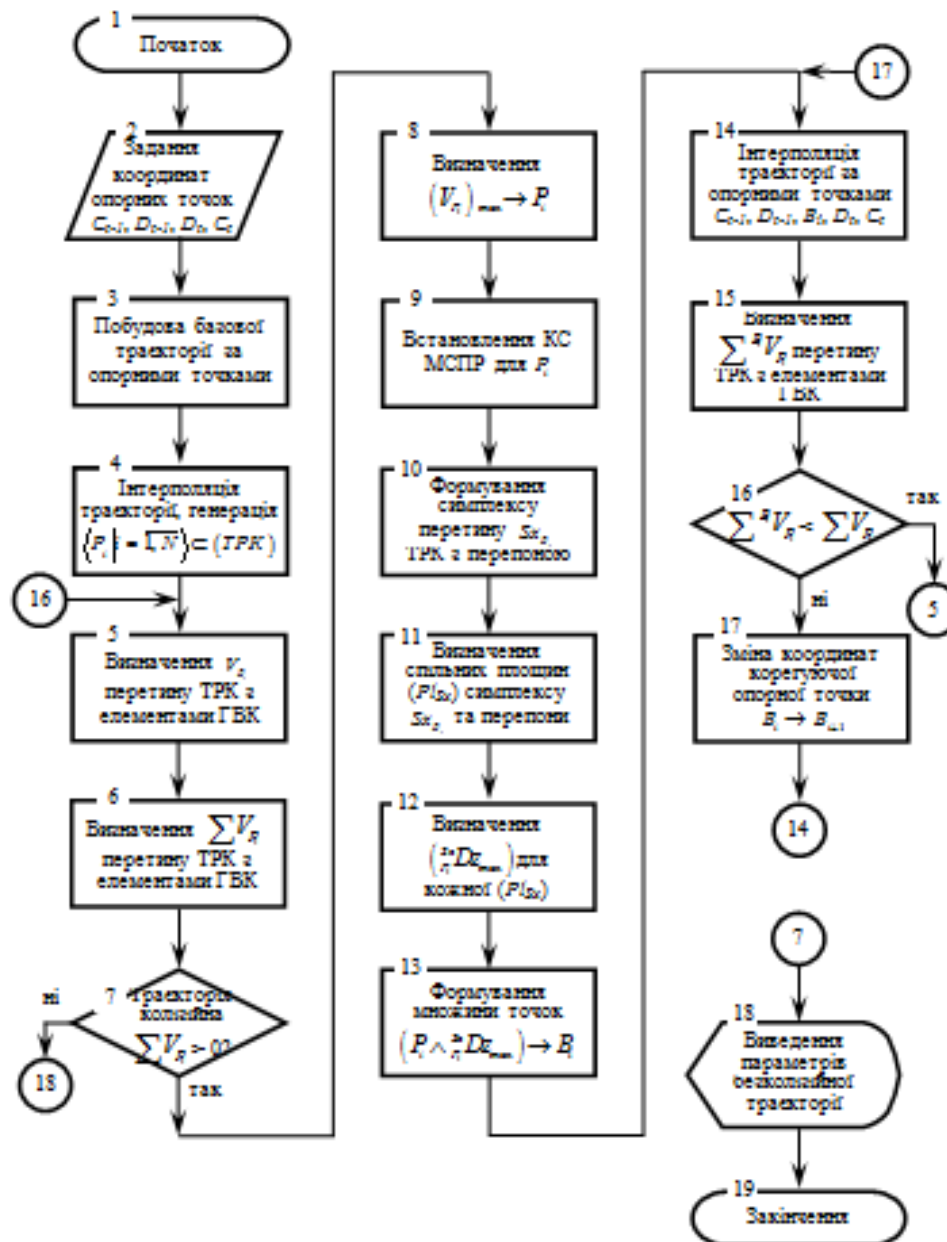
9. Повторення к. 1-8 до побудови безколізійної траєкторії.



безколізійна траєкторія
колізійна траєкторія



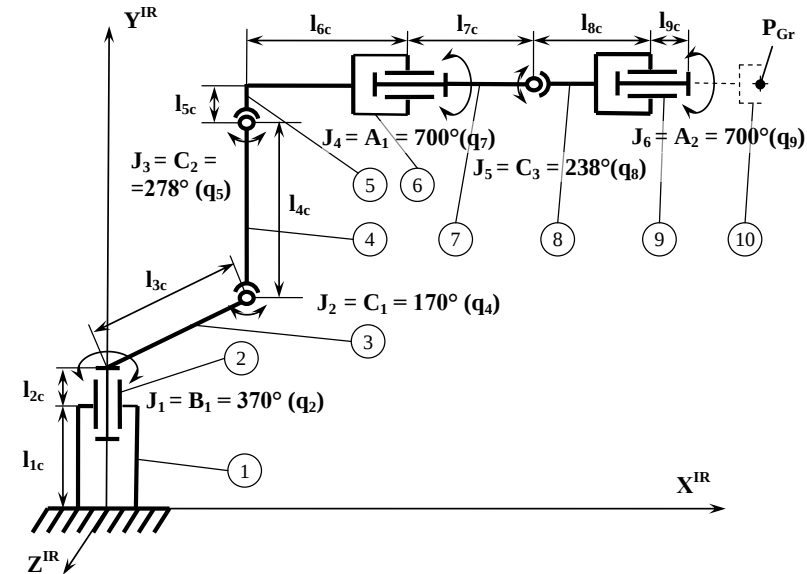
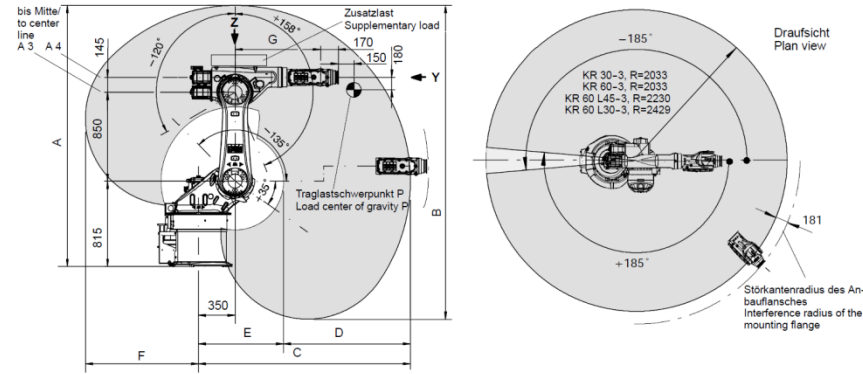
ALGORITHM OF AUTOMATED GENERATION OF NON-COLLISIONAL TRAJECTORIES



INFORMATION MODEL OF MANIPULATION SYSTEM

IR's MS mod. KUKA KR-30-3 (Germany):

KUKA KR-30-3 = {
 P:0,0,0;
 O:1,0,0,0;
 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;]);
 L4:(D:-1,1,0;S:850;m:60;v:126; Qmin: 0.462,0,0,-0.887; Qmax:
 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;]);
 L7:(D:0,1,0;S:465;m:10;v:260; Qmin: -0.996,0,-0.087,0; Qmax:-
 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; Qmin: 0.508,0,0,-0.862; Qmax:
 0.508,0,0,0.862; GP:[cr:0, 0, 0, 50, 170;]);
 L9:(D:0,1,0;S:10;m:1;v:322; Qmin: -0.996,0,-0.087,0; Qmax:-
 0.996,0,0.087,0; GP:[cr:0, 0, 0, 40, 10;]);
}



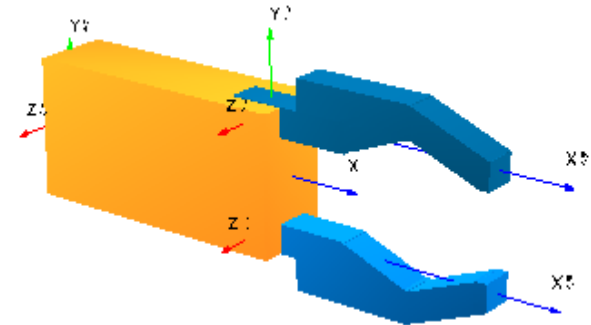
INFORMATION MODEL OF THE GRIPPER

Gr mod. LGR 32 (Schunk, Germany):

```
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;]]
}
```



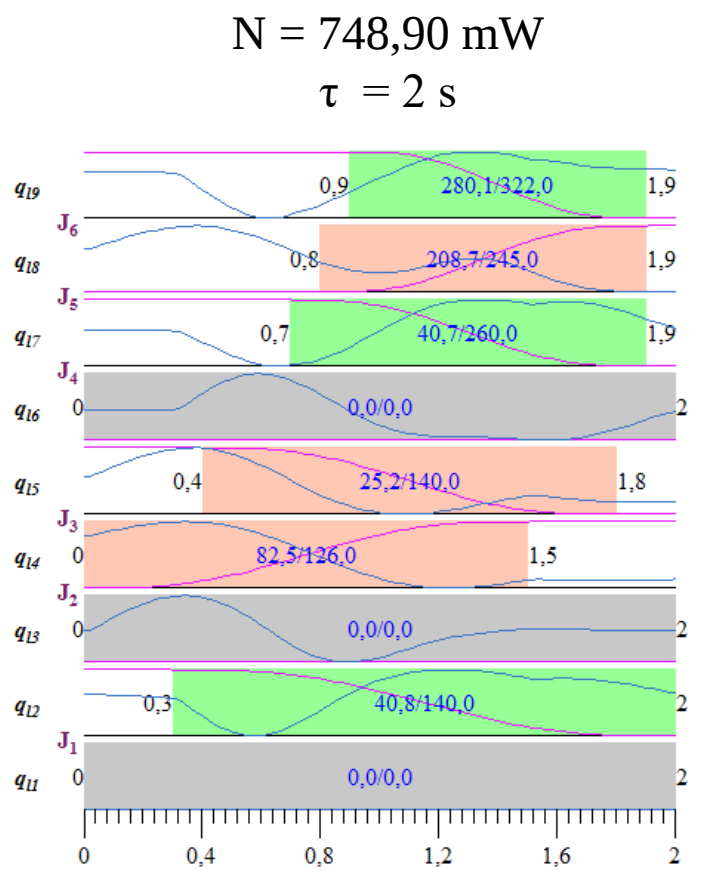
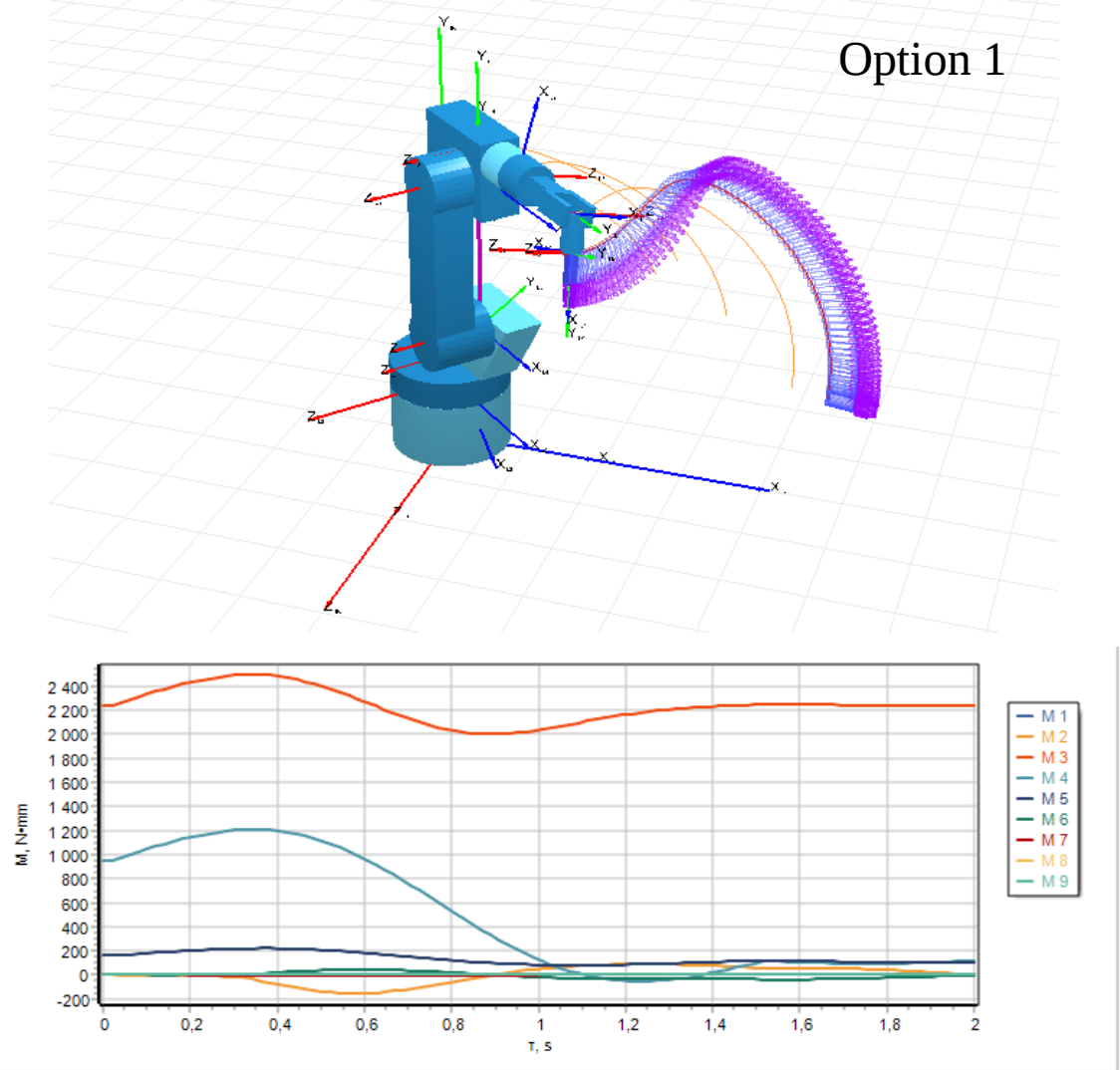
Конструкція ЗППР



3D-еквівалент ЗППР

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

(reducing the duration of GC's working from the first link (rack) of IR's MS to Gr)

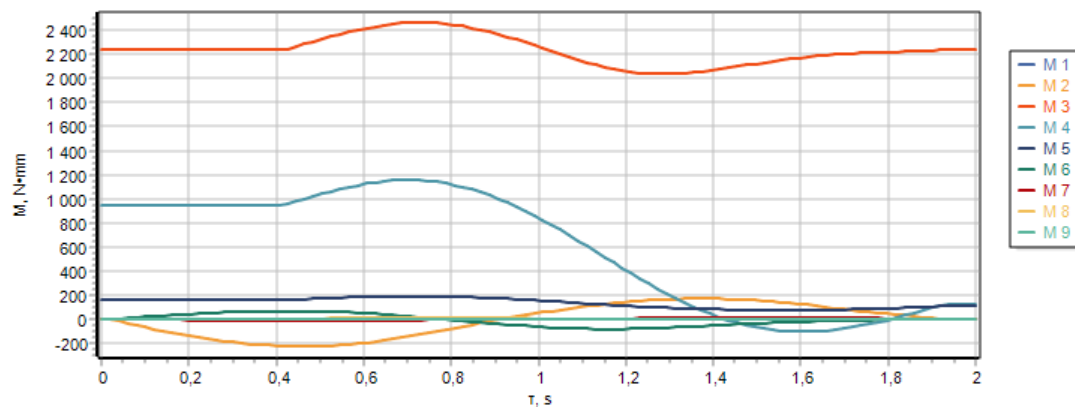
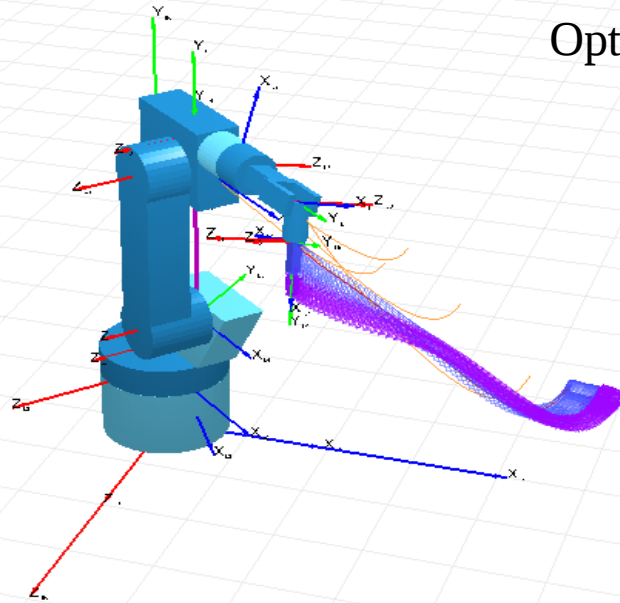


P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0; **P2:** X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

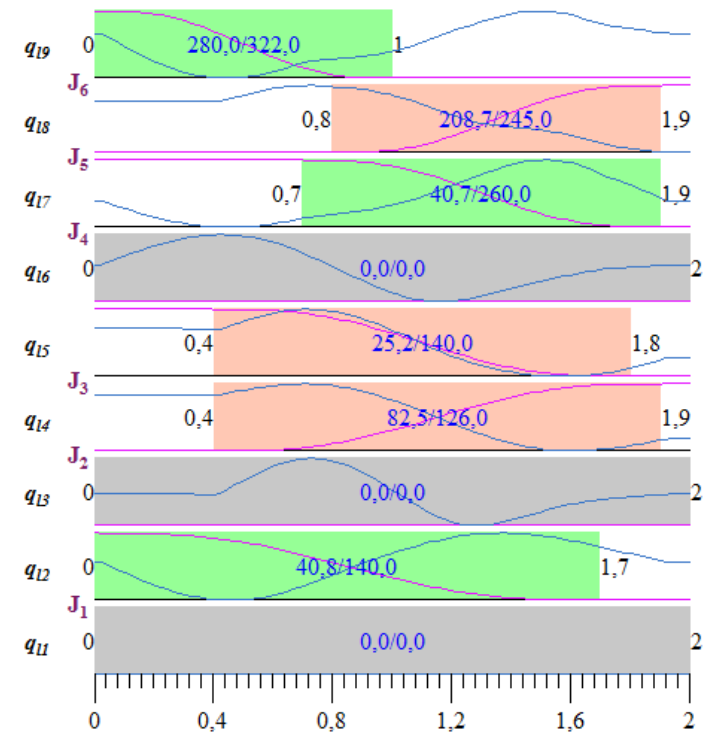
(reducing the duration of GC's working from Gr to the first link of IR's MS)

Option 2



$N = 702,95 \text{ mW}$

$\tau = 1,9 \text{ s}$

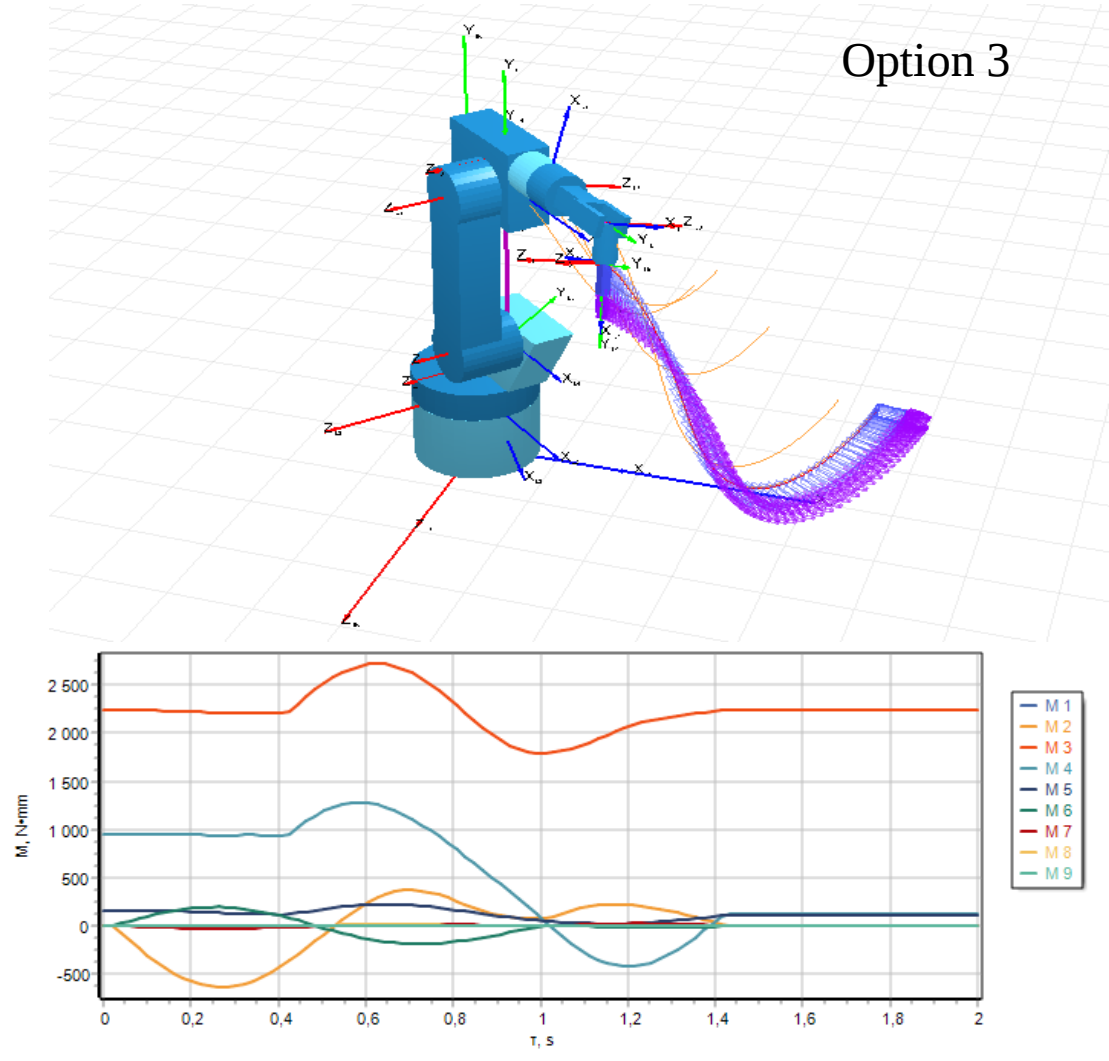


P1: $X = 2234,8$; $Y = 1012,9$; $Z = 0$;

P2: $X = 996,1$; $Y = 1327,8$; $Z = 1110,1$.

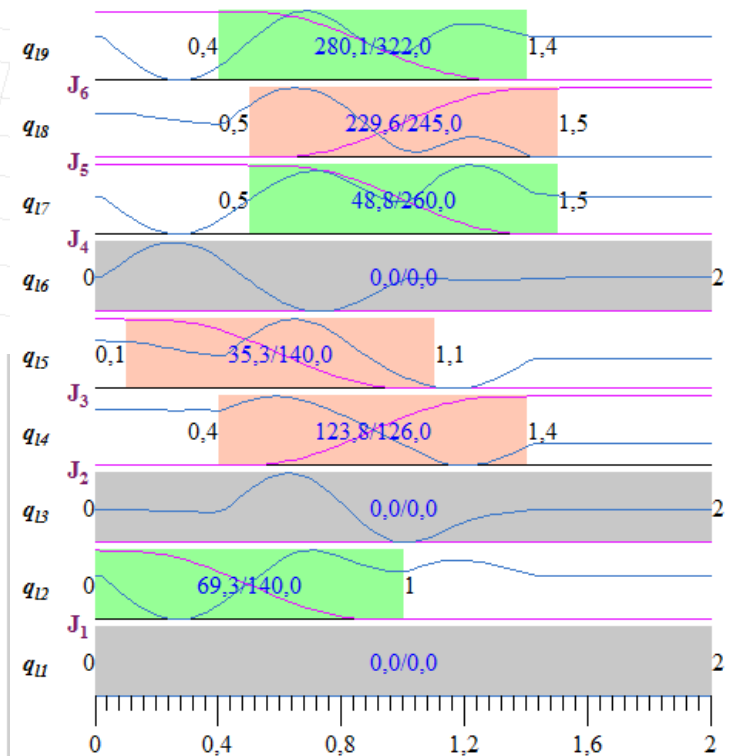
AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

(duration of activated GC's working for 1 second from Gr to the first link of IR's MS)



$$N = 878,95 \text{ mW}$$

$$\tau = 1,5 \text{ s}$$



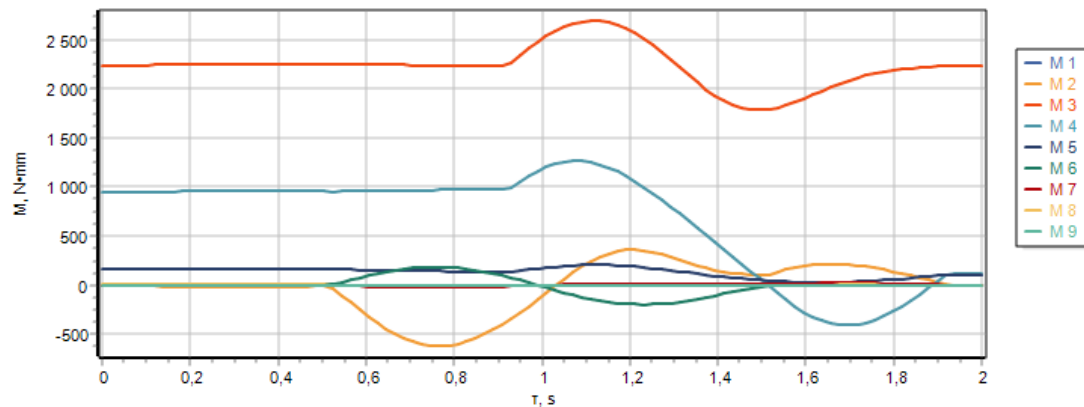
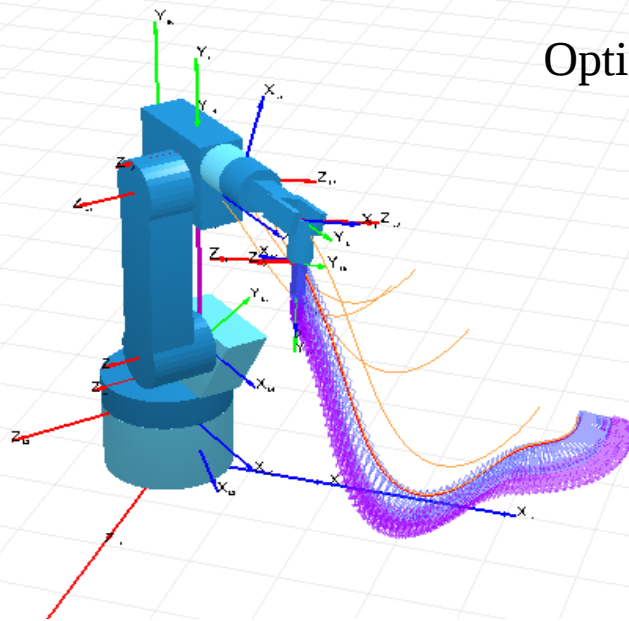
P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0;

P2: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

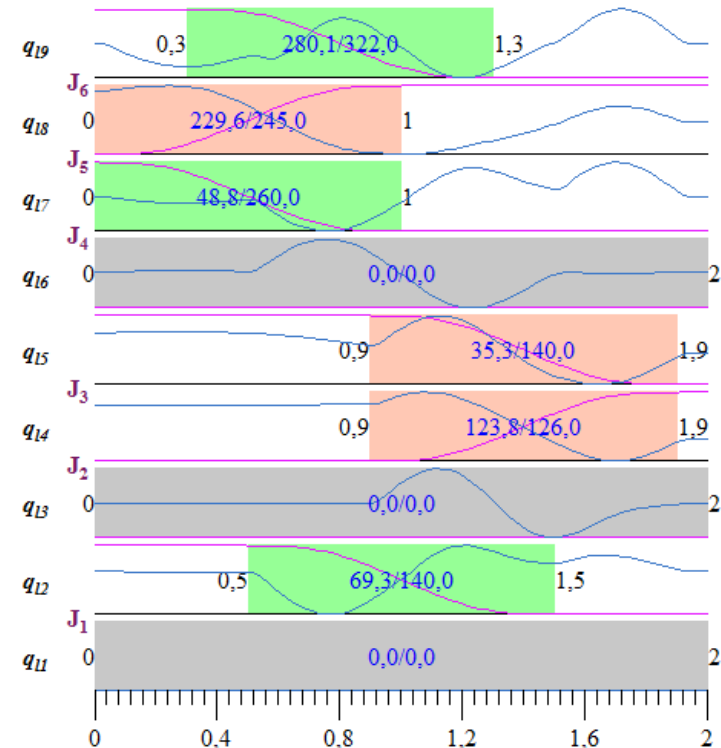
(duration of activated GC's working for 1 second from the first link of IR's MS to Gr)

Option 4



$N = 821,80 \text{ mW}$

$\tau = 1,9 \text{ s}$



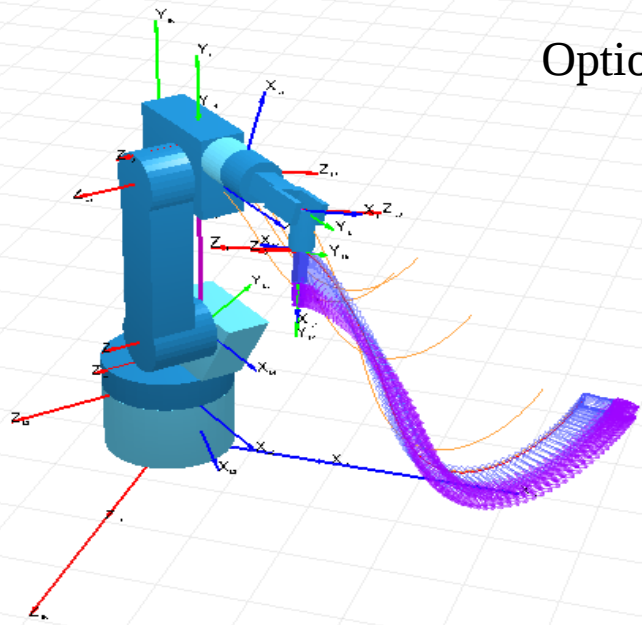
P1: $X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0;$

P2: $X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.$

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

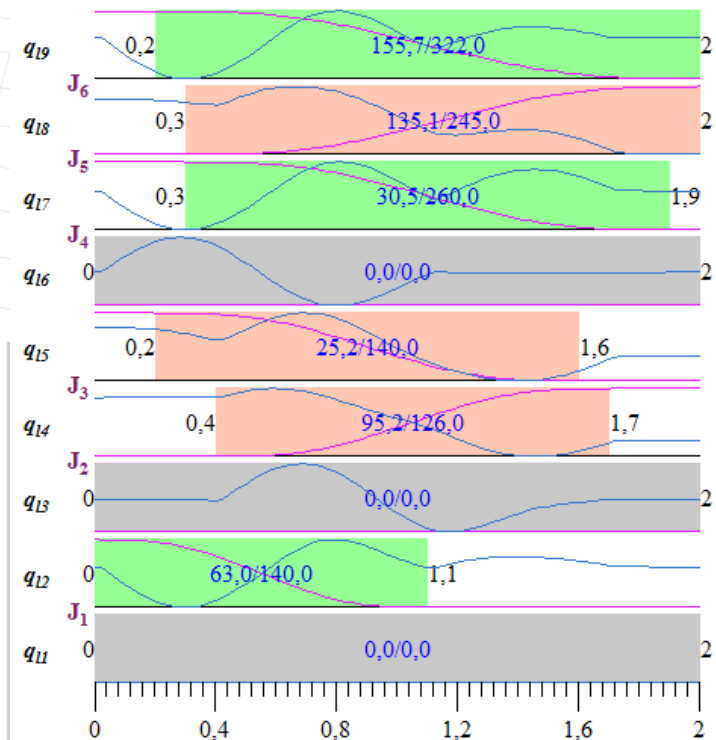
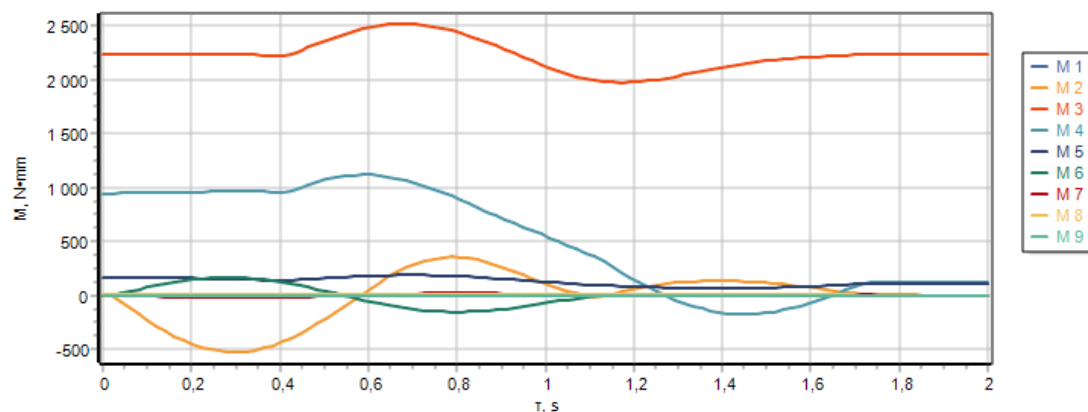
(increasing the duration of GC's working from Gr to the first link of IR's MS)

Option 6



$$N = 741,26 \text{ mW}$$

$$\tau = 2 \text{ s}$$

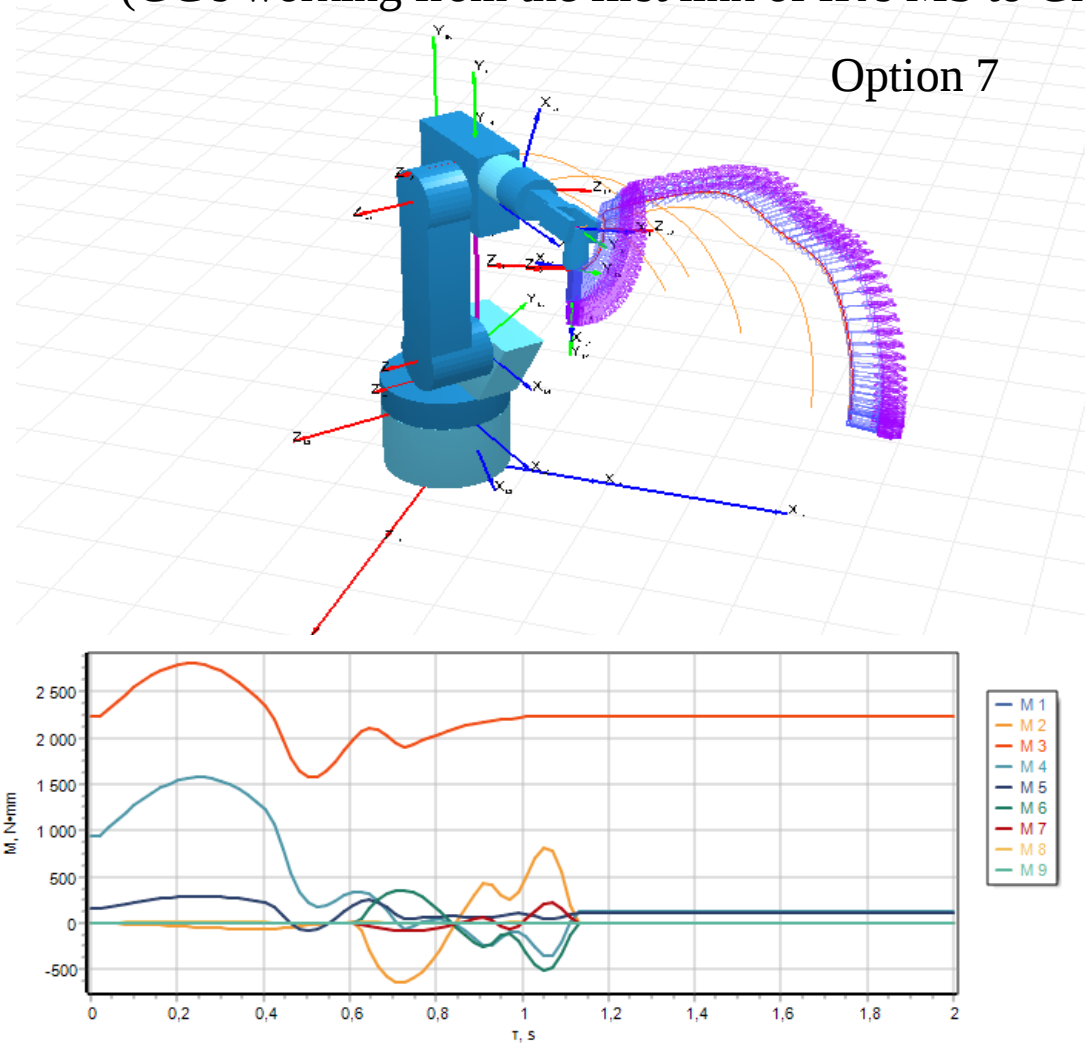


P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0;

P2: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

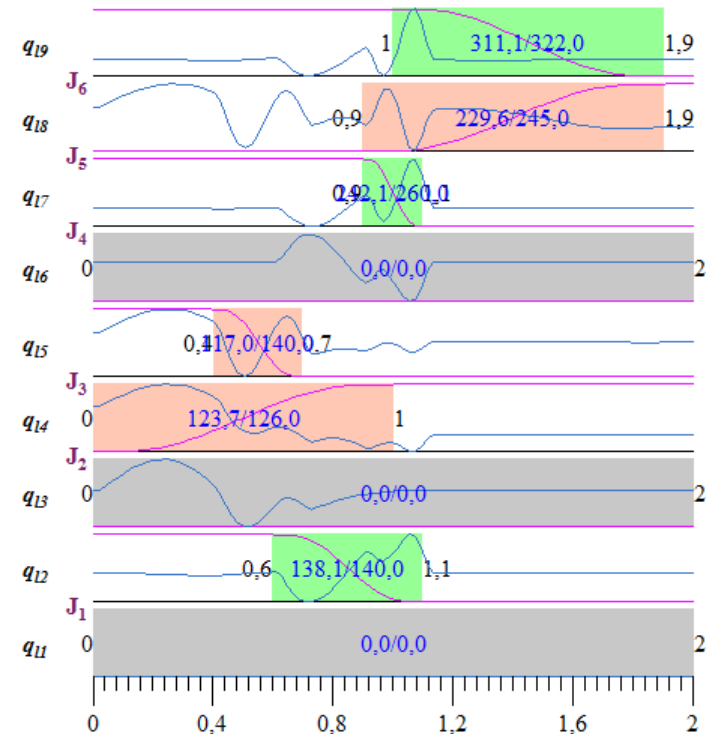
AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

(GC's working from the first link of IR's MS to Gr with the highest allowable speed)



$$N = 1004,52 \text{ mW}$$

$$\tau = 1,9 \text{ s}$$



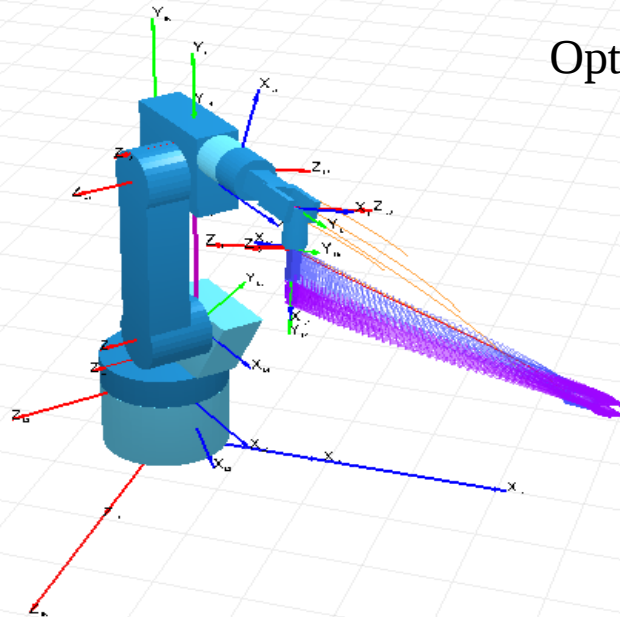
P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0;

P2: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

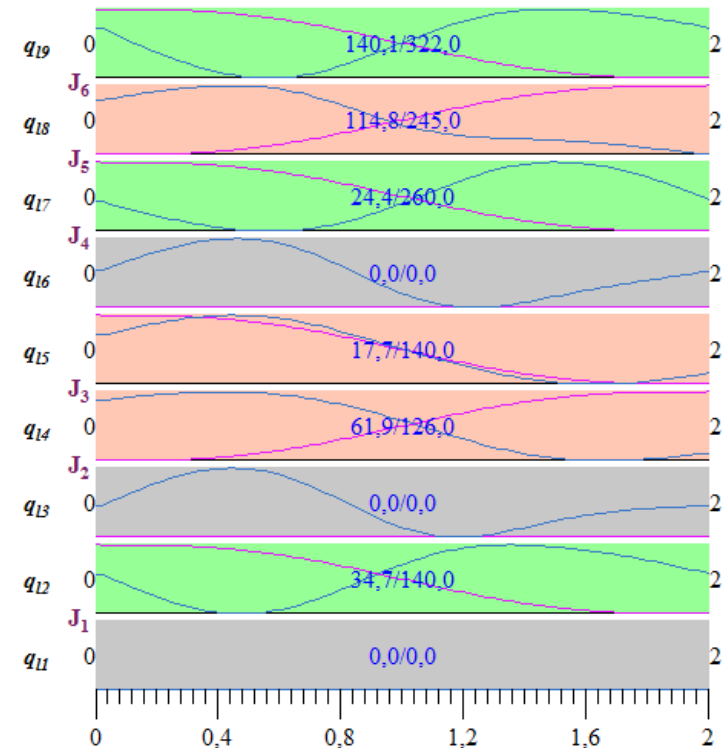
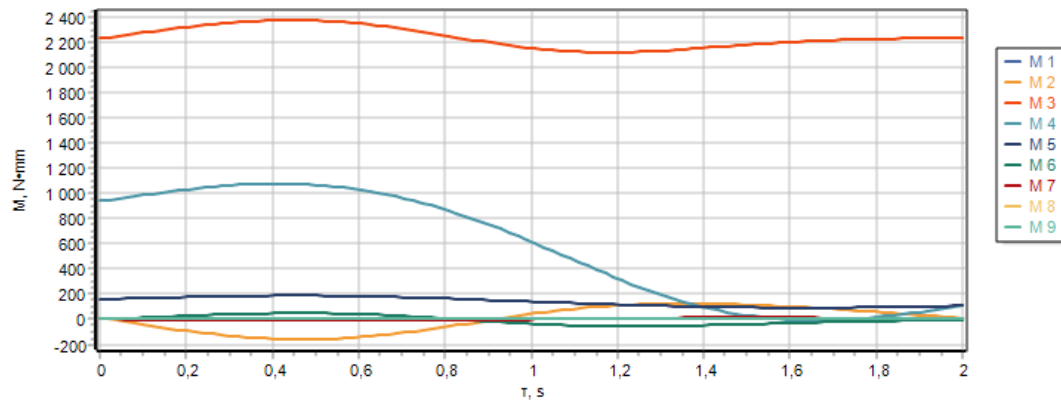
(simultaneous start and completion at the same time of GS's working)

Option 8



$$N = 729,38 \text{ mW}$$

$$\tau = 2 \text{ s}$$



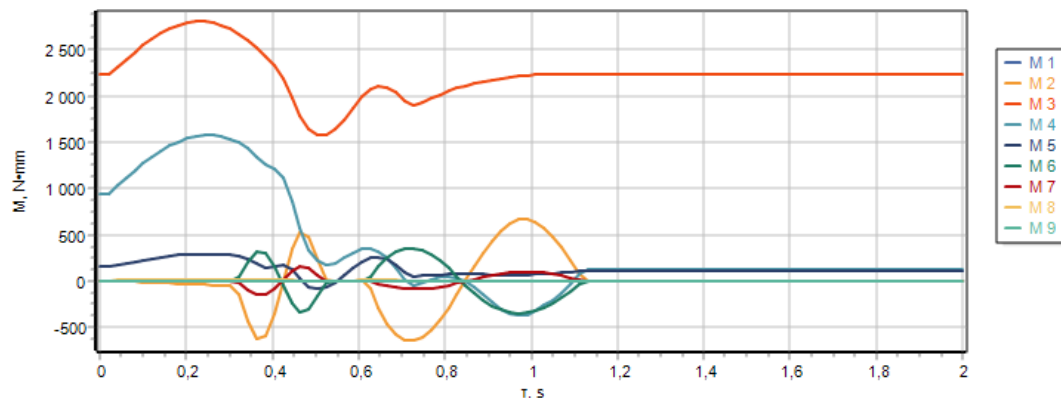
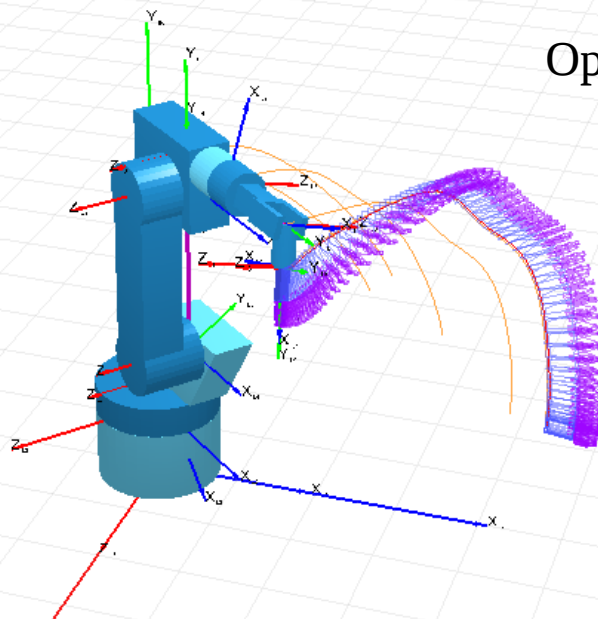
P1: $X = 2234,8$; $Y = 1012,9$; $Z = 0$;

P2: $X = 996,1$; $Y = 1327,8$; $Z = 1110,1$.

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

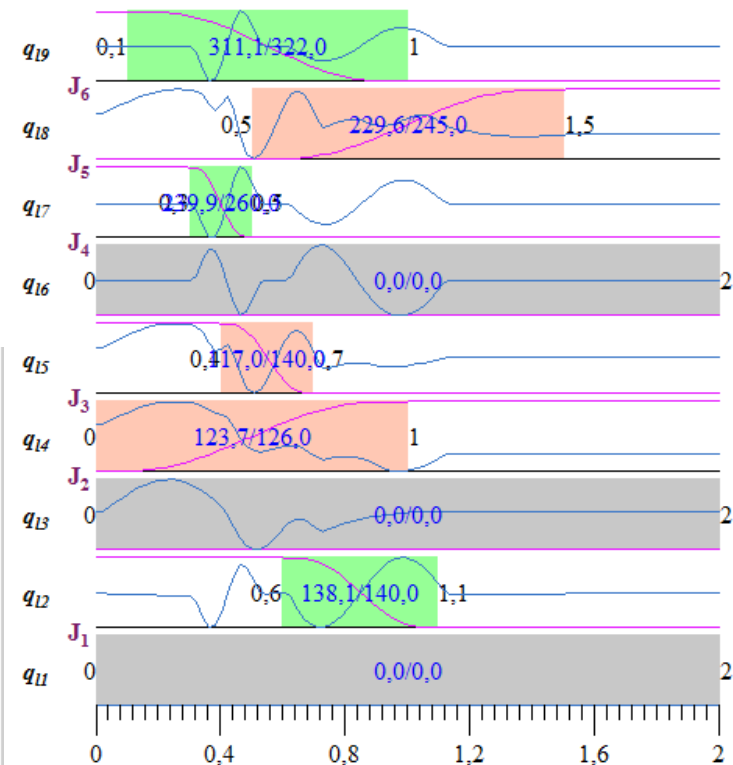
(GC's working from Gr to the first link of IR's MS with the highest allowable speed)

Option 9



$N = 1043,38 \text{ mW}$

$\tau = 1,5 \text{ s}$



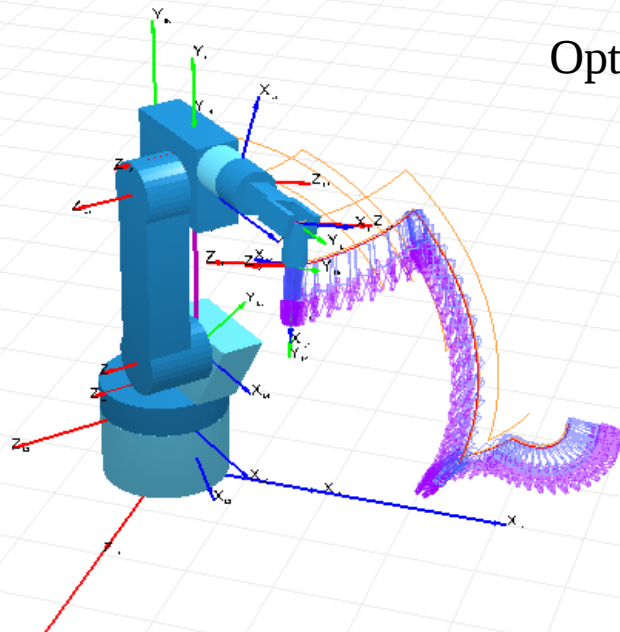
P1: $X = 2234,8$; $Y = 1012,9$; $Z = 0$;

P2: $X = 996,1$; $Y = 1327,8$; $Z = 1110,1$.

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

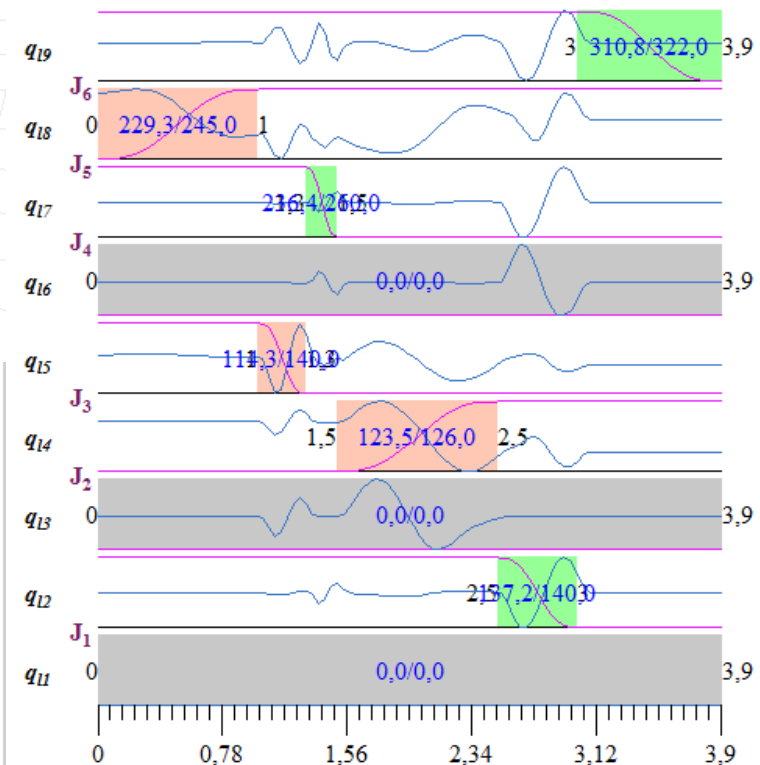
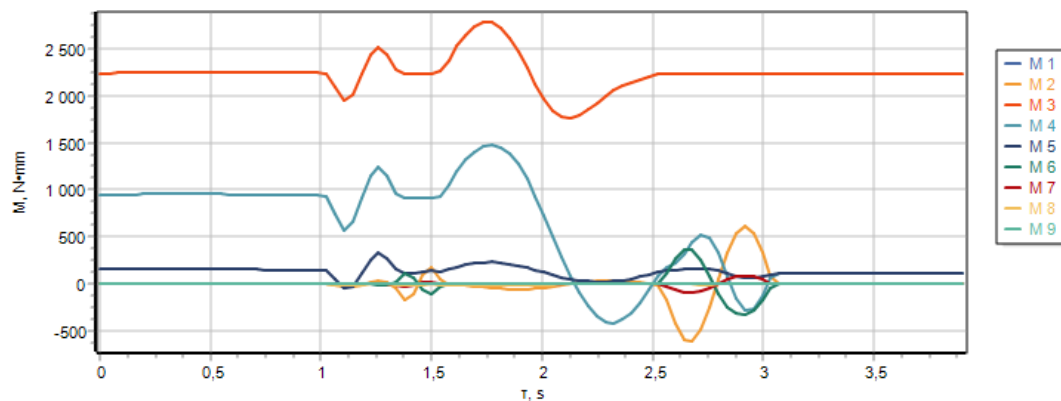
(GC's working with the highest allowable speed for MS with positional control system)

Option 10



$N = 1098,14 \text{ mW}$

$\tau = 3,9 \text{ s}$



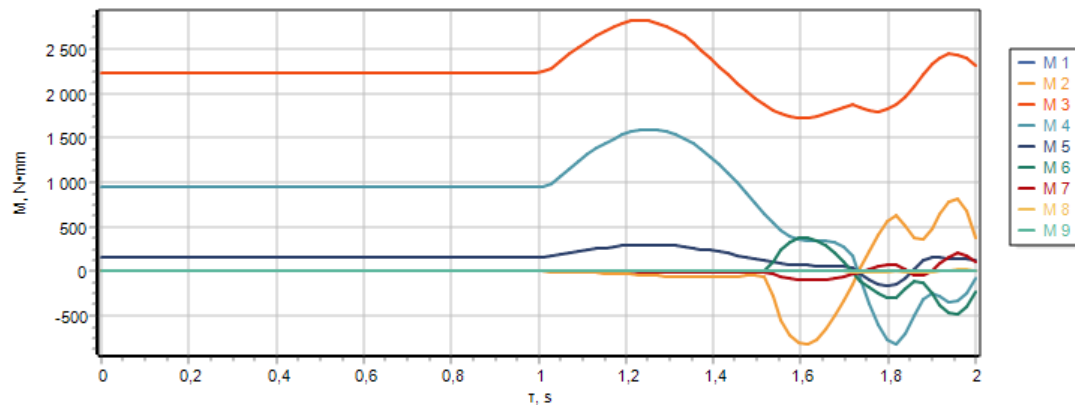
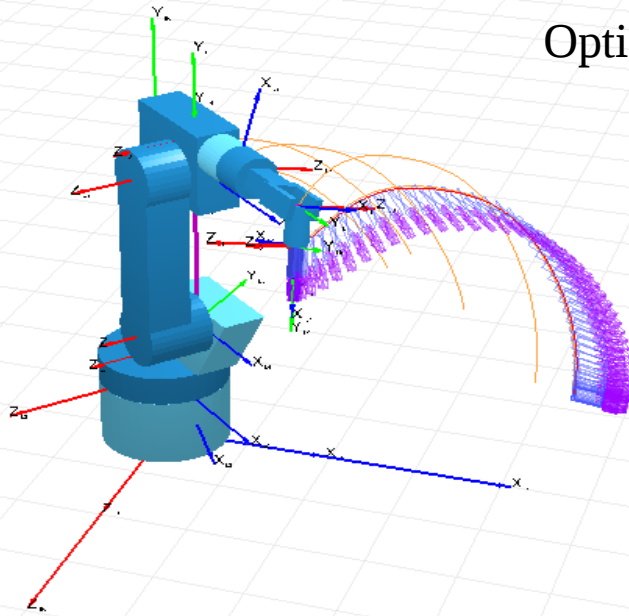
P1: $X = 2234,8$; $Y = 1012,9$; $Z = 0$;

P2: $X = 996,1$; $Y = 1327,8$; $Z = 1110,1$.

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

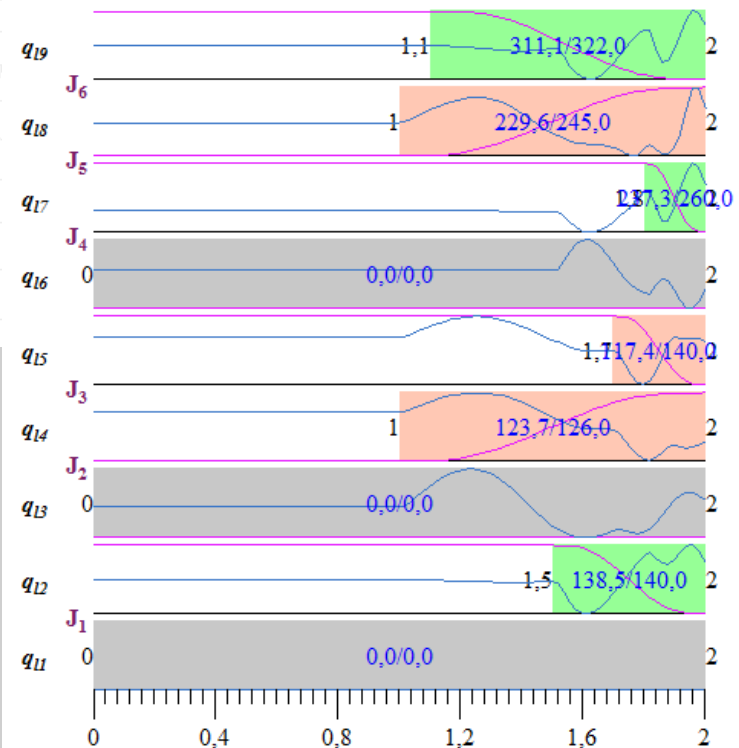
(simultaneous completion of GC's working with the largest allowable speed)

Option 11



$$N = 1256,53 \text{ mW}$$

$$\tau = 1 \text{ s}$$



P1: X = 2234,8; Y = 1012,9; Z = 0;

P2: X = 996,1; Y = 1327,8; Z = 1110,1.

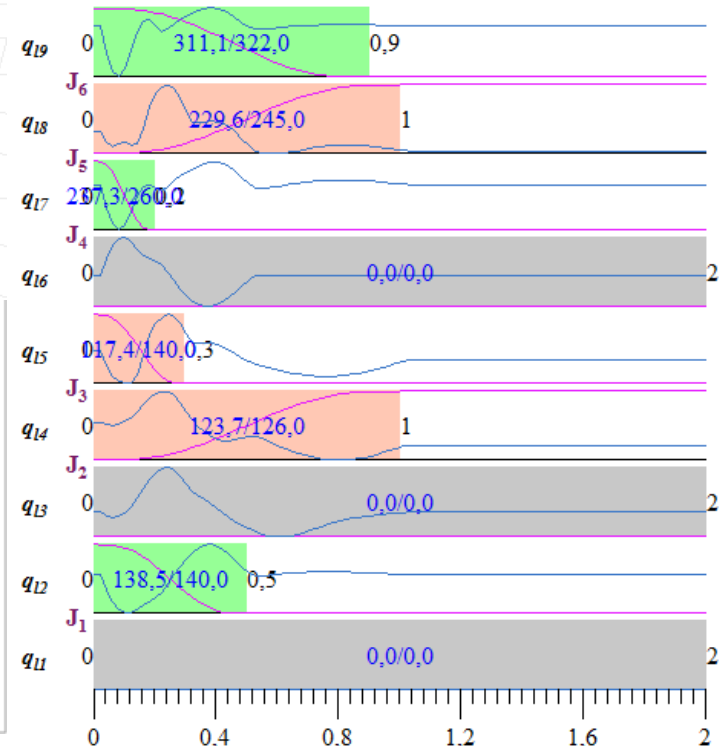
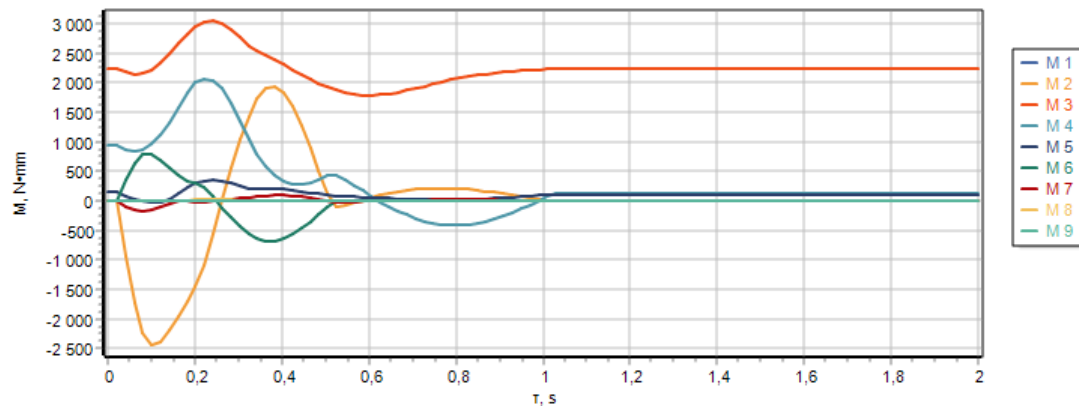
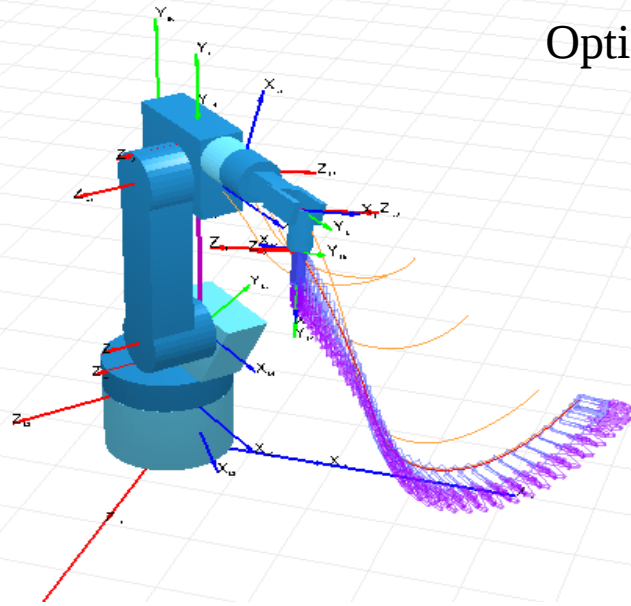
AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

(simultaneous start of GC's working with the largest allowable speed)

Option 12

$N = 1512,80 \text{ mW}$

$\tau = 1 \text{ s}$



P1: $X = 2234,8$; $Y = 1012,9$; $Z = 0$;

P2: $X = 996,1$; $Y = 1327,8$; $Z = 1110,1$.

AUTOMATED RESEARCH OF TRAJECTORY PROBLEMS IN INDUSTRIAL ROBOTICS BY THE CRITERIONS OF POWER CONSUMPTION + SPEED

Comparison table of the received results

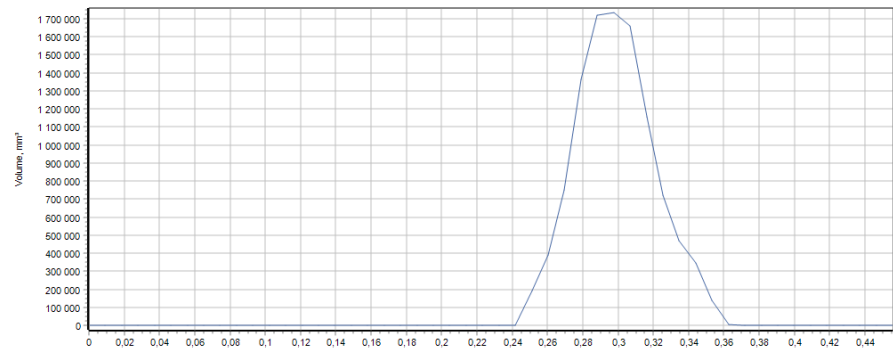
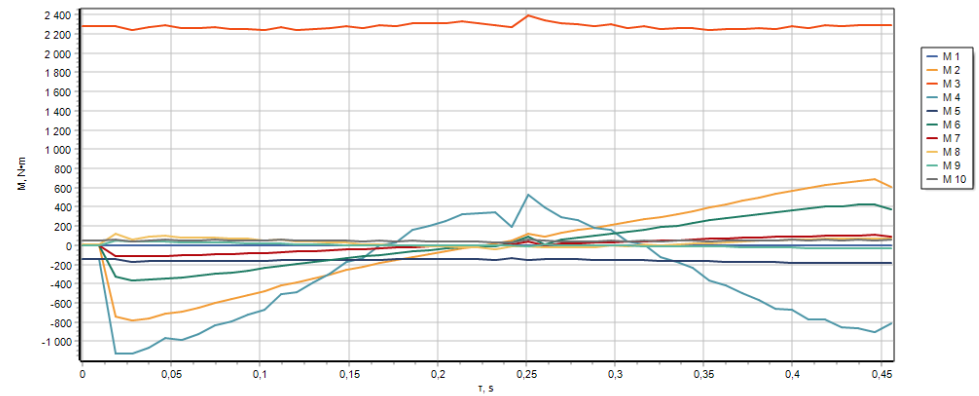
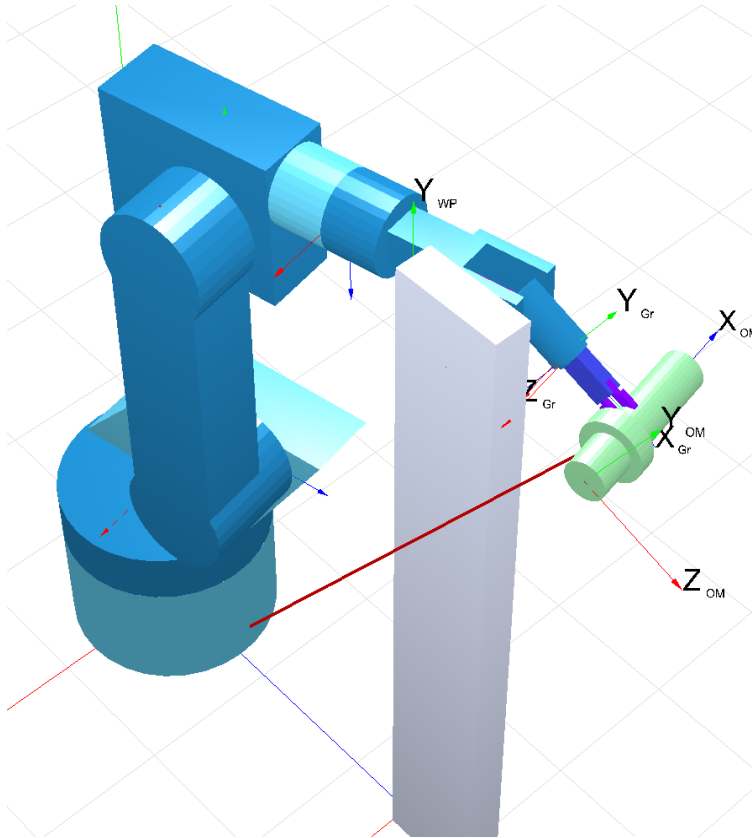
№ option	N, mWatt	ΔN, %	τ_{P1-P2}, seconds	Δτ_{P1-P2}, %
1 (slide 44)	748,90	6.54	2,0	100
2 (slide 45)	702,95	0	1,9	90
3 (slide 46)	878,95	25.04	1,5	50
4 (slide 47)	821,80	16.91	1,9	90
5 (slide 48)	756,10	7.56	2,0	100
6 (slide 49)	741,26	5.45	2,0	100
7 (slide 50)	1004,52	42.9	1,9	90
8 (slide 51)	729,38	3.76	2,0	100
9 (slide 52)	1043,38	48.43	1,5	50
10 (slide 53)	1098,14	56.22	3,9	290
11 (slide 54)	1256,53	78.75	1,0	0
12 (slide 55)	1512,80	115.21	1,0	0

$$\Delta N = \frac{N_i - N_{\min}}{N_{\min}} \cdot 100\%$$

$$\Delta \tau = \frac{\tau_i - \tau_{\min}}{\tau_{\min}} \cdot 100\%$$

$$i = \overline{1,12}$$

EXAMPLE OF THE NONCOLLISIONAL TRAJECTORY FINDING



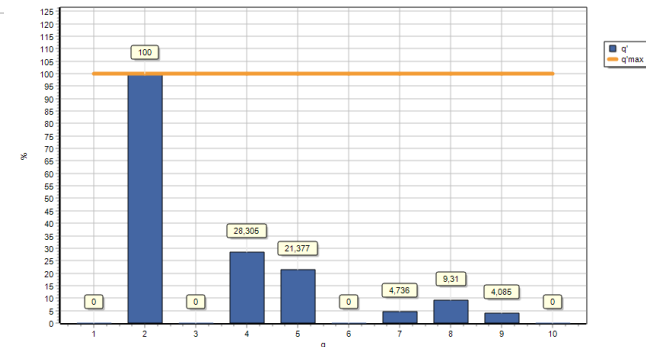
Позначення	Координати опорних точок			Напрям вектора Gr			Напрям осі O_{t-1}^d		
	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C_{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
C_t	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98

$$\tau = [0,24, 0,36], \tau_{colmax} = 0,30$$

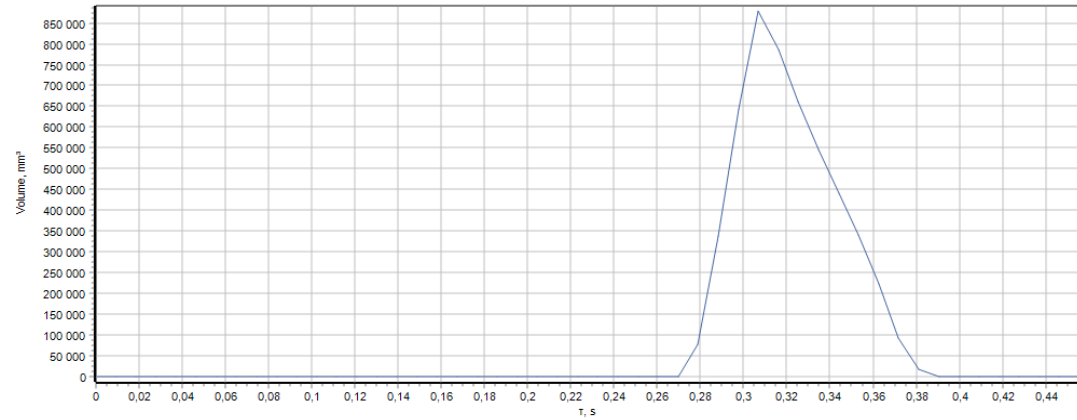
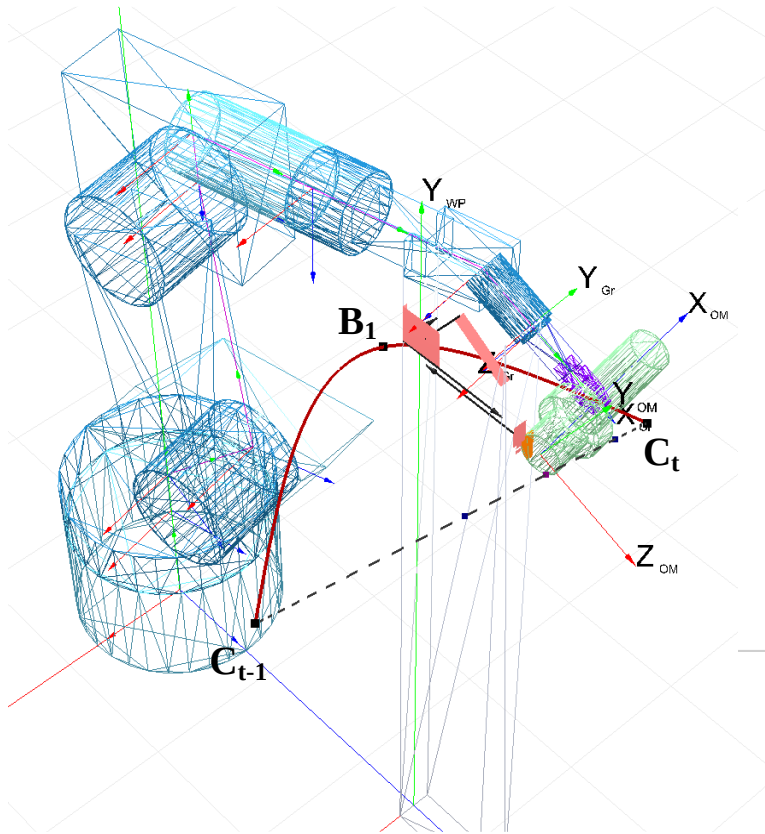
Розрахований час відпрацювання траєкторії: $\tau = 0,45$ с

Розраховане значення енергоємності траєкторії ПР між тт. C_{t-1} та C_t :

$$E = 0,000038 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$



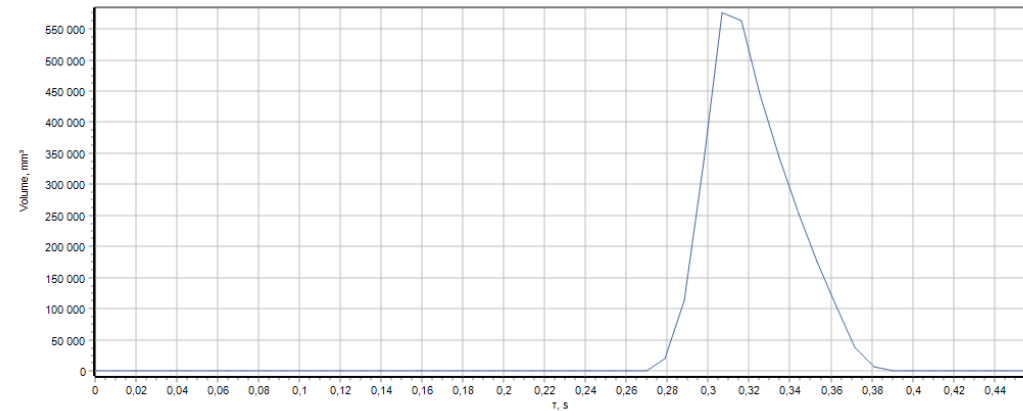
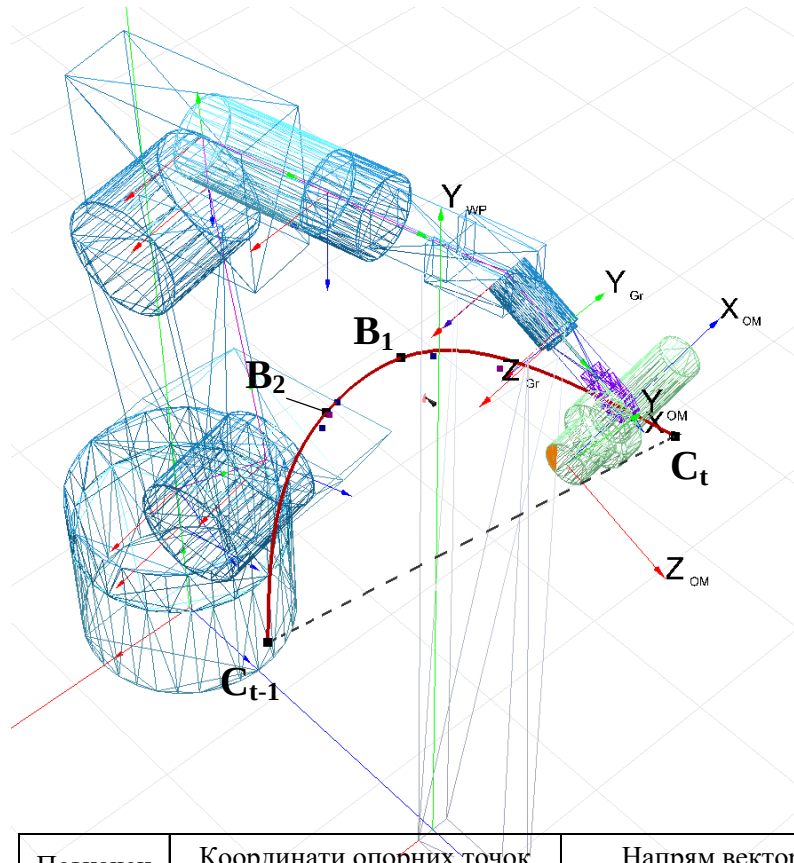
EXAMPLE OF NONCOLLISIONAL TRAJECTORY FINDING



Позначен ня	Координати опорних точок			Напряв вектора Gr			Напряв осі $O_{t-1}^{d_g}$		
	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C_{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
B_1	876,47	1639,73	-5,75	—	—	—	—	—	—
C_t	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98

$$\tau = [0,27, 0,39], \tau_{\text{colmax}} = 0,31$$

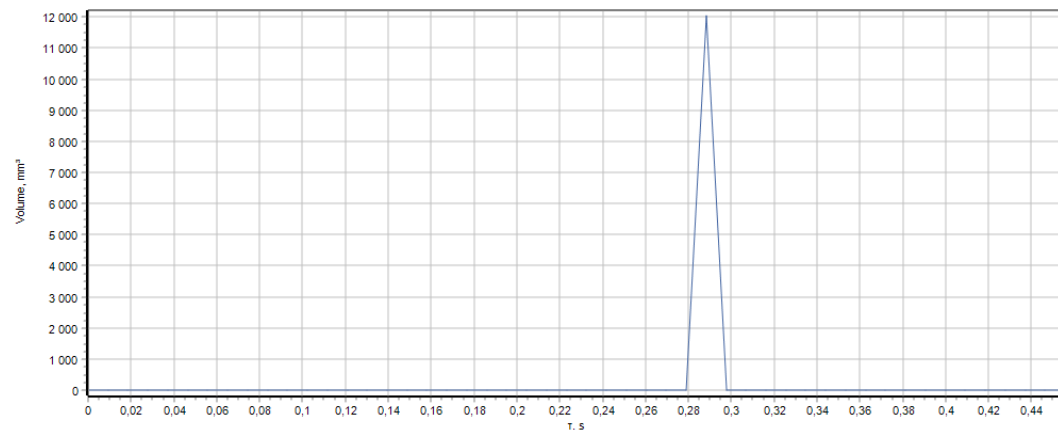
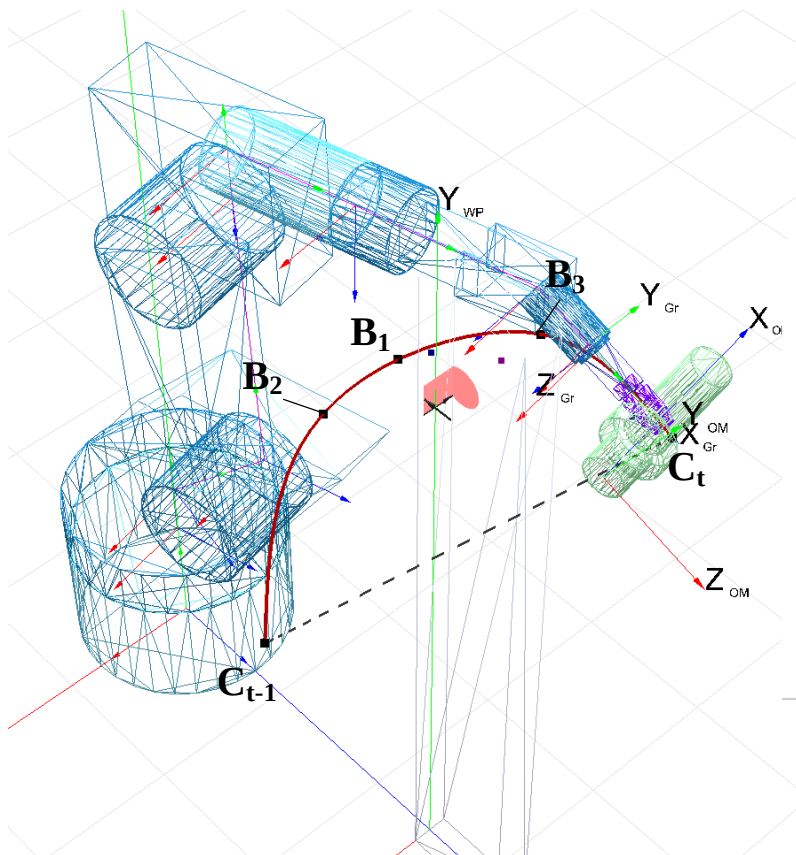
EXAMPLE OF THE NONCOLLISIONAL TRAJECTORY FINDING



Позначен ня	Координати опорних точок			Напрям вектора Gr			Напрям осі $O_{t-1}^{d_s}$		
	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C _{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
B ₂	891,92	1642,85	217,51	—	—	—	—	—	—
B ₁	876,47	1639,73	-5,75	—	—	—	—	—	—
C _t	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98

$$\tau = [0,27, 0,39], \tau_{\text{colmax}} = 0,31$$

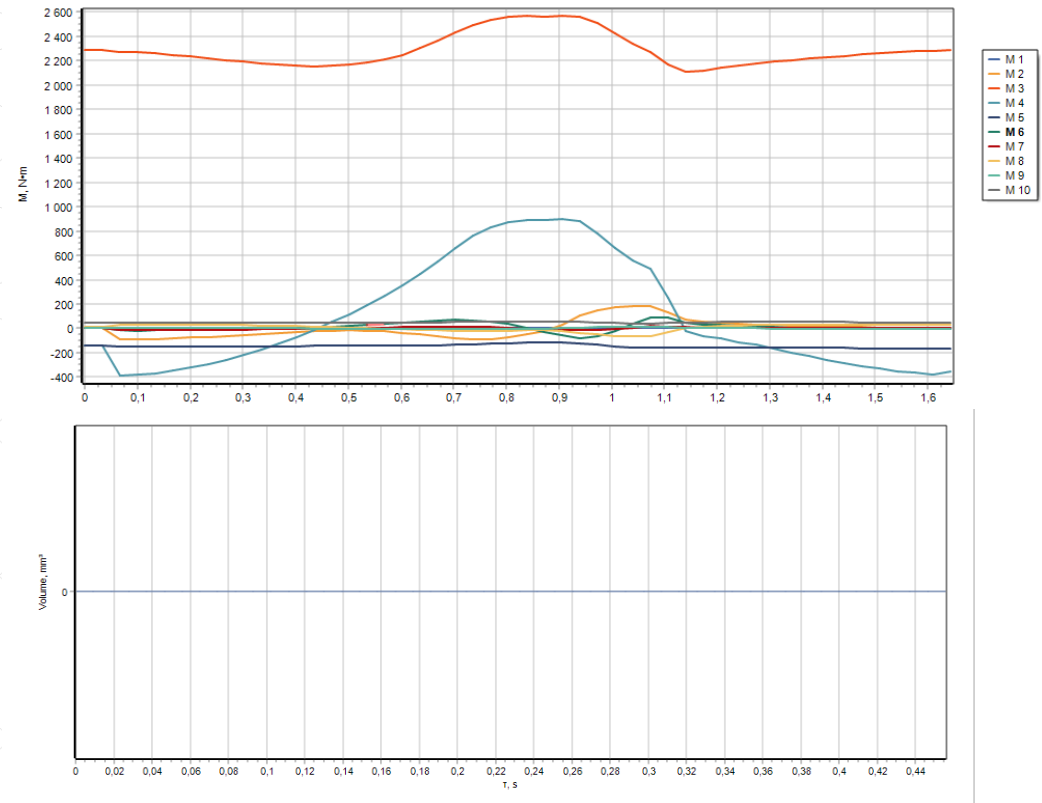
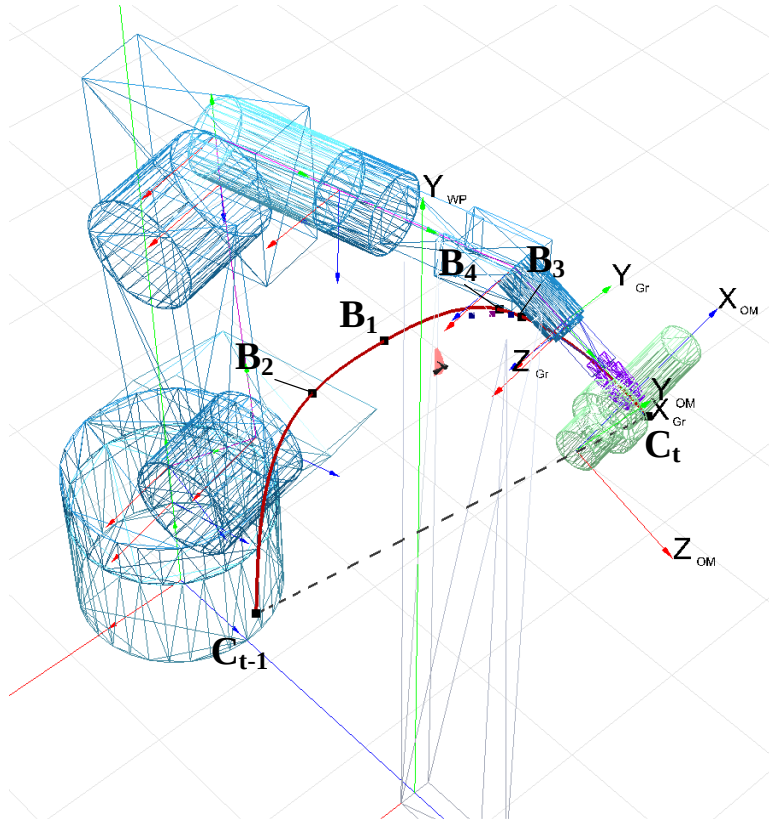
EXAMPLE OF THE NONCOLISION TRAJECTORY FINDING



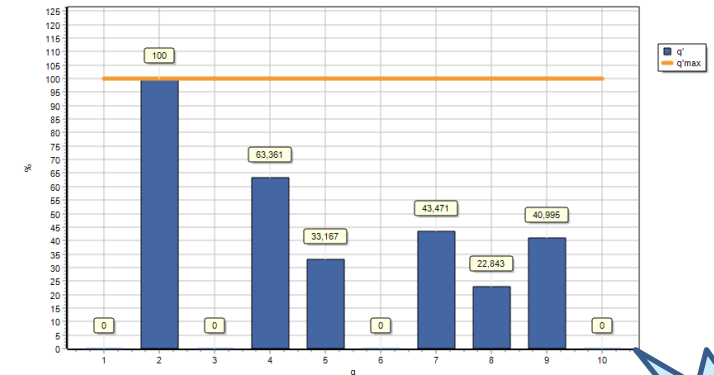
Позначення	Координати опорних точок			Напрям вектора Gr			Напрям осі $O_{t-1}^{d_8}$		
	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C_{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
B_2	891,92	1642,85	217,51	—	—	—	—	—	—
B_1	876,47	1639,73	-5,75	—	—	—	—	—	—
B_3	1024,99	1637,46	-285,72	—	—	—	—	—	—
C_t	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98

$$\tau = [0,28, 0,30], \tau_{colmax} = 0,29$$

EXAMPLE OF THE NONCOLLISIONAL TRAJECTORY FINDING



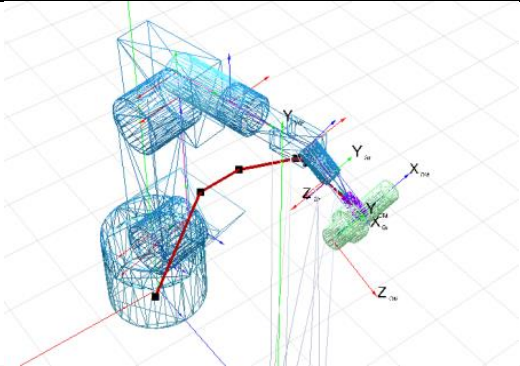
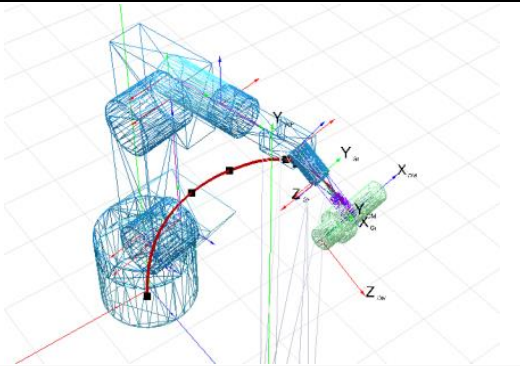
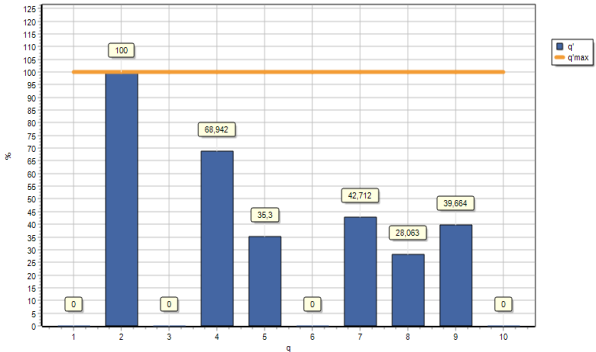
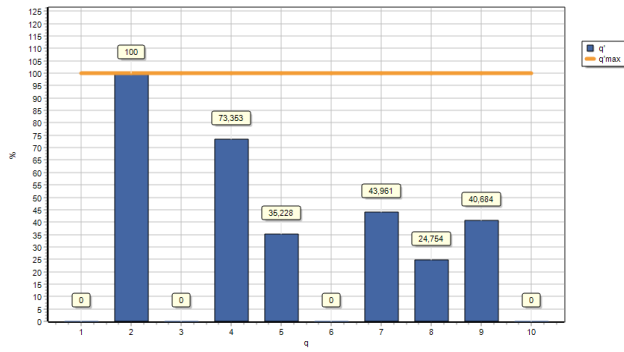
Позначення	Координати опорних точок			Напрям вектора Gr			Напрям осі $O_{t-1}^{d_1}$		
	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm	X, mm	Y, mm	Z, mm
C_{t-1}	1276,46	1649,52	701,21	-0,76	0,49	-0,41	-0,48	0,00	0,87
B_2	891,92	1642,85	217,51	—	—	—	—	—	—
B_1	876,47	1639,73	-5,75	—	—	—	—	—	—
B_4	974,94	1637,75	-265,41	—	—	—	—	—	—
B_3	1024,99	1637,46	-285,72	—	—	—	—	—	—
C_t	1422,82	1636,13	-271,24	-0,83	0,52	0,15	0,18	0,00	0,98



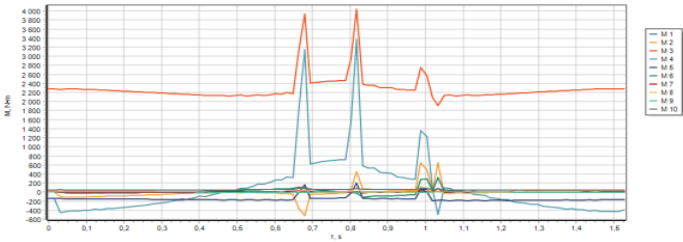
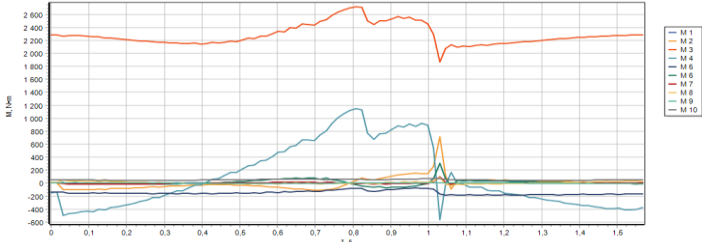
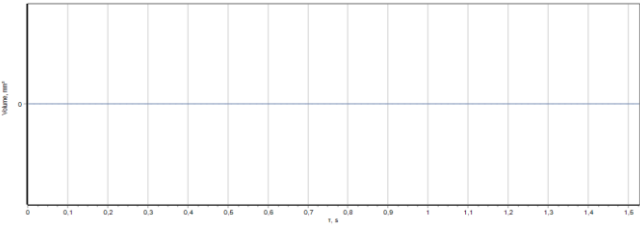
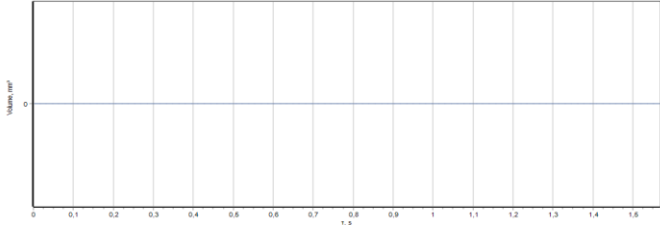
Розрахований час відпрацювання траєкторії: $\tau = 1,64c$

Розраховане значення енергосмості траєкторії ПР між т. C_{t-1} та C_t : $E = 0,00028 \text{ кВт} \cdot \text{год}$

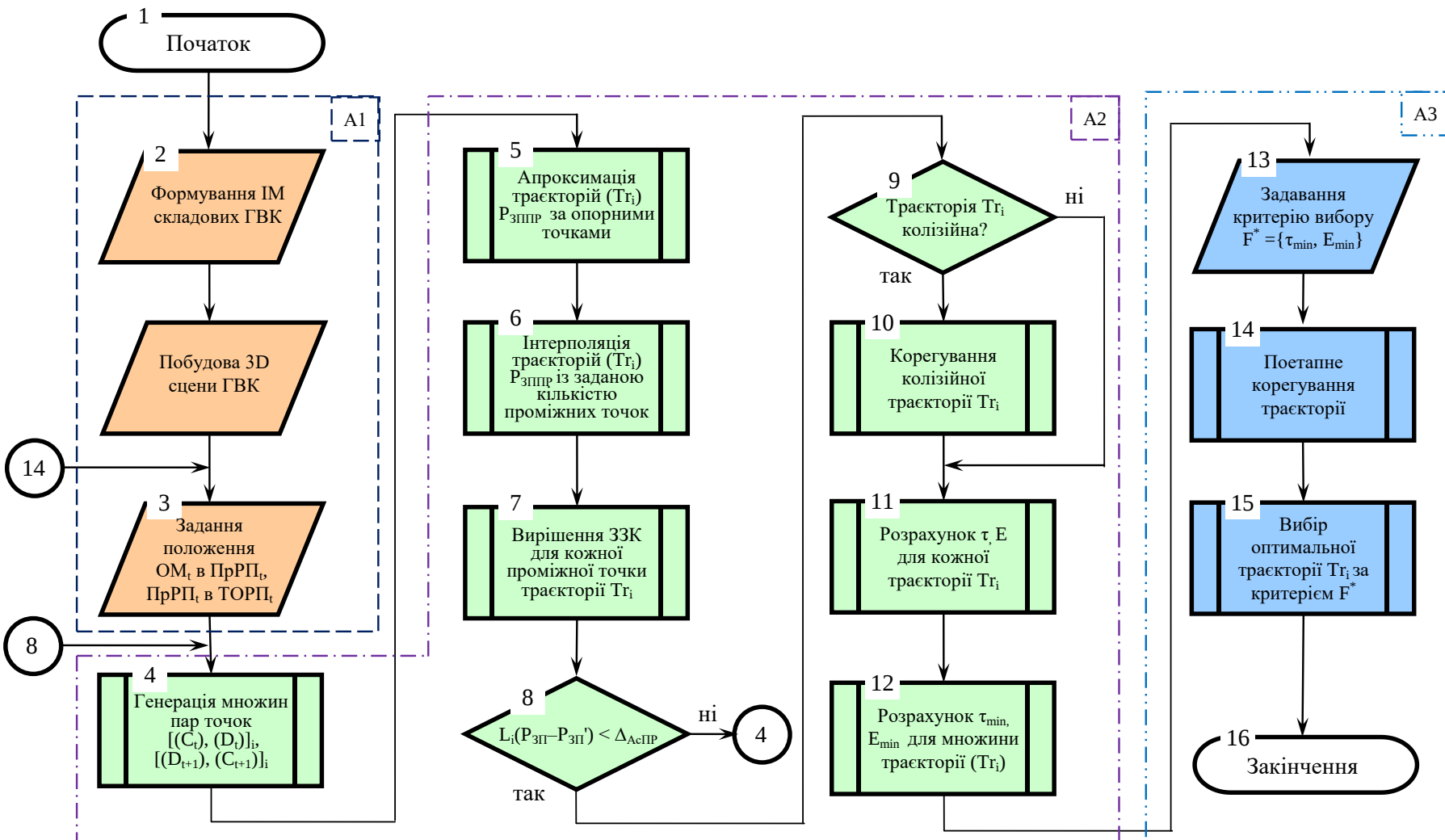
COMPARISON OF THE TRAJECTORIES BASED ON GENERATED EXTRA POINTS

Spline	Linear	Akima	Cubic
τ, c	1,52	1,56	1,67
$E \times 10^{-3},$ кВт·год	0,2892	0,2937	0,2841
Траєкторія			—
Обмеження по швидкості			—

COMPARISON OF THE TRAJECTORIES BASED ON THE GENERATED EXTRA POINTS

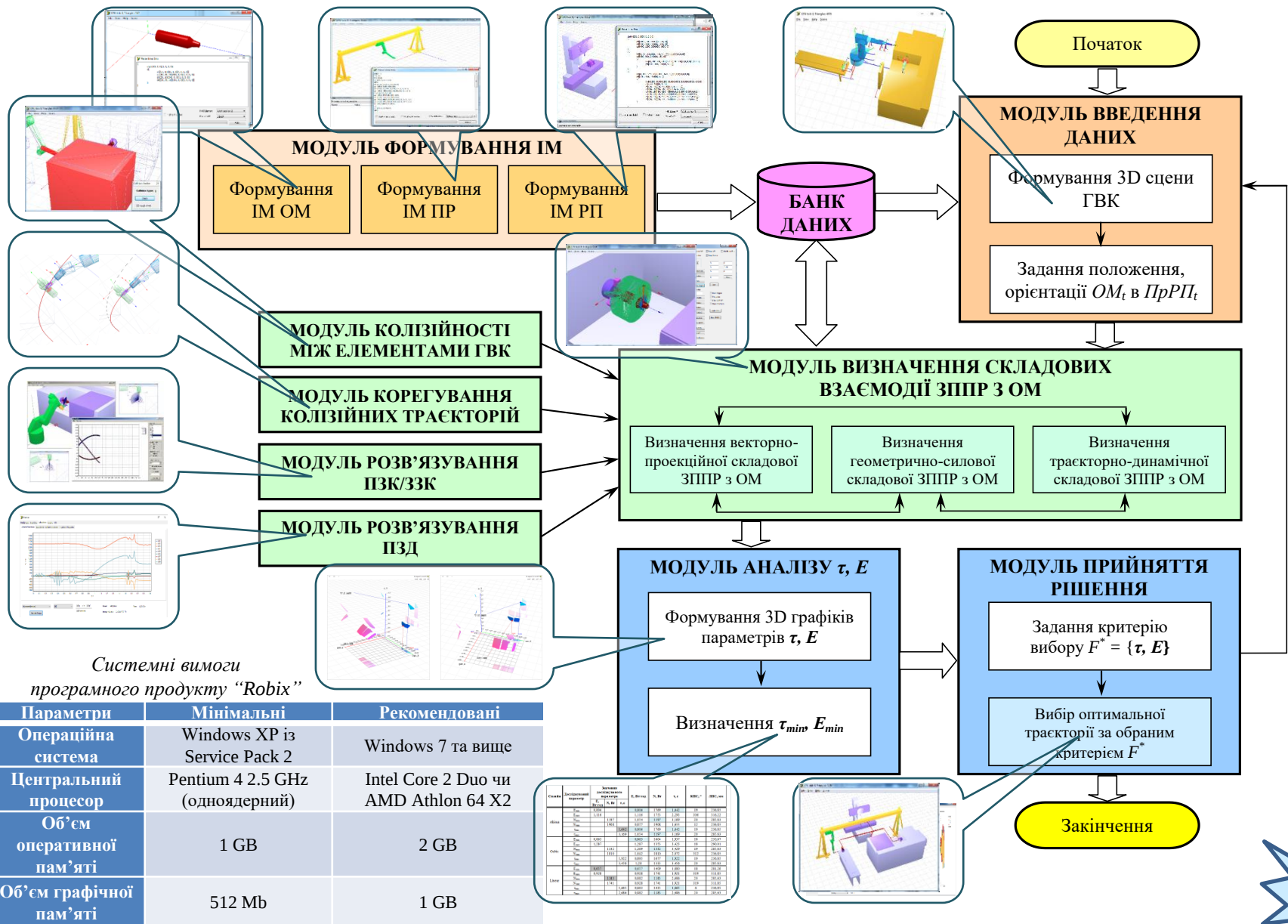
Spline	Linear	Akima	Cubic
Графік зміни моментів			—
Графік колізій			—

THE MAIN ALGORITHM OF DSS FOR CALCULATION PARAMETERS OF THE GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION



THE STRUCTURE SCHEME OF THE PROPOSED DSS SOFTWARE

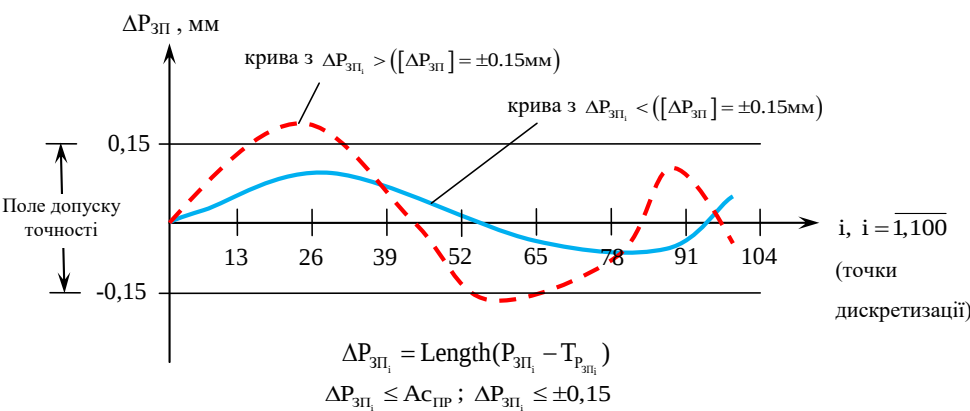
(a part of “Robix” software, developed in Delphi)



THE CONDITIONS OF THE RESEARCHING PARAMETRIES OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION

– сцена: const

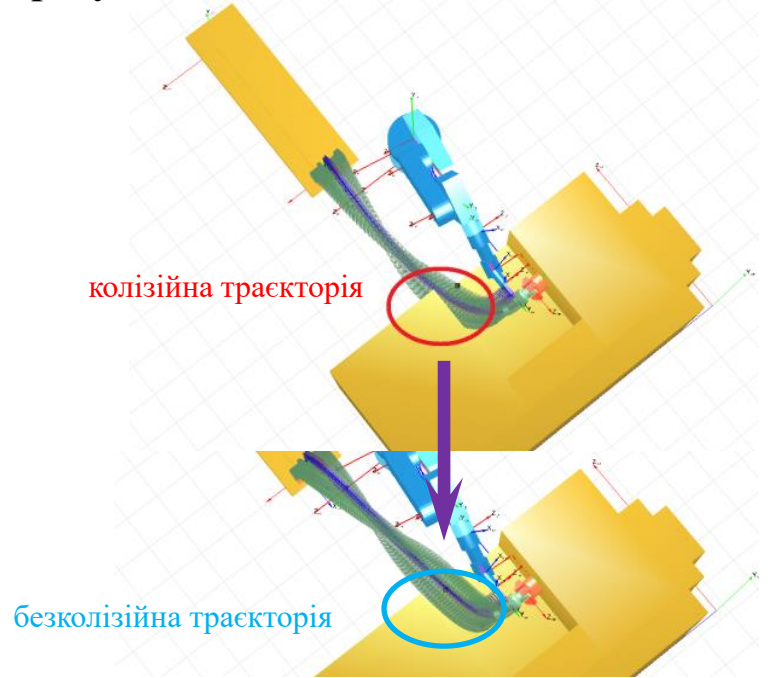
– обмеження за точністю:



– відносні розташування СК ОМ:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OM _{t-1}	←	←	→	→	↖	↖	↘	↘	↓	↓	↑	↑
OM _t	→	←	→	←	→	←	→	←	→	←	→	←
паралельно-горизонтальне				перпендикулярно-горизонтальне				перпендикулярно-вертикальне				

– корегування колізійних траєкторій:



– апроксимація траєкторій за сплайнами:
Cubic, Akima, Linear

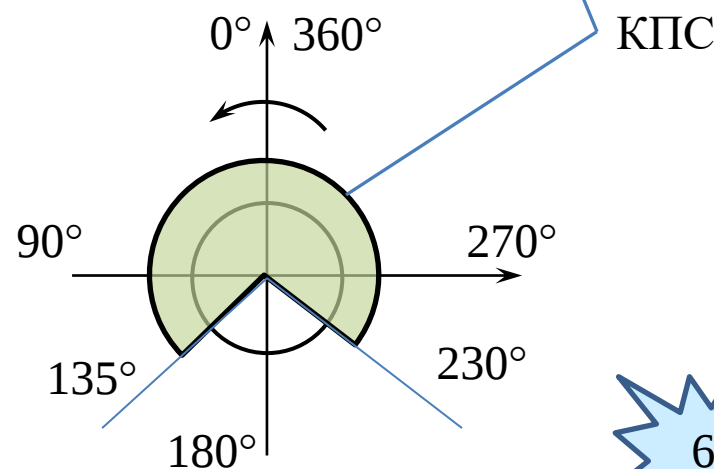
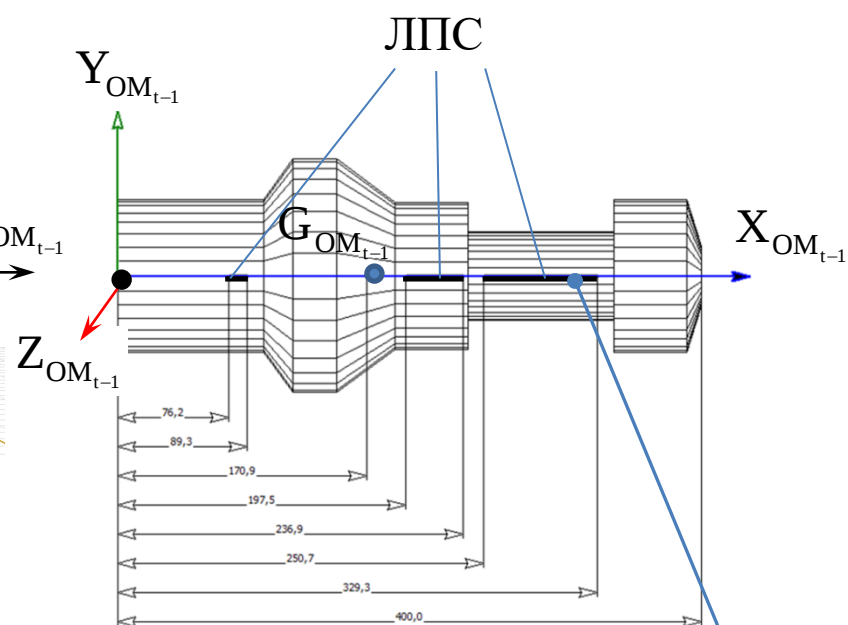
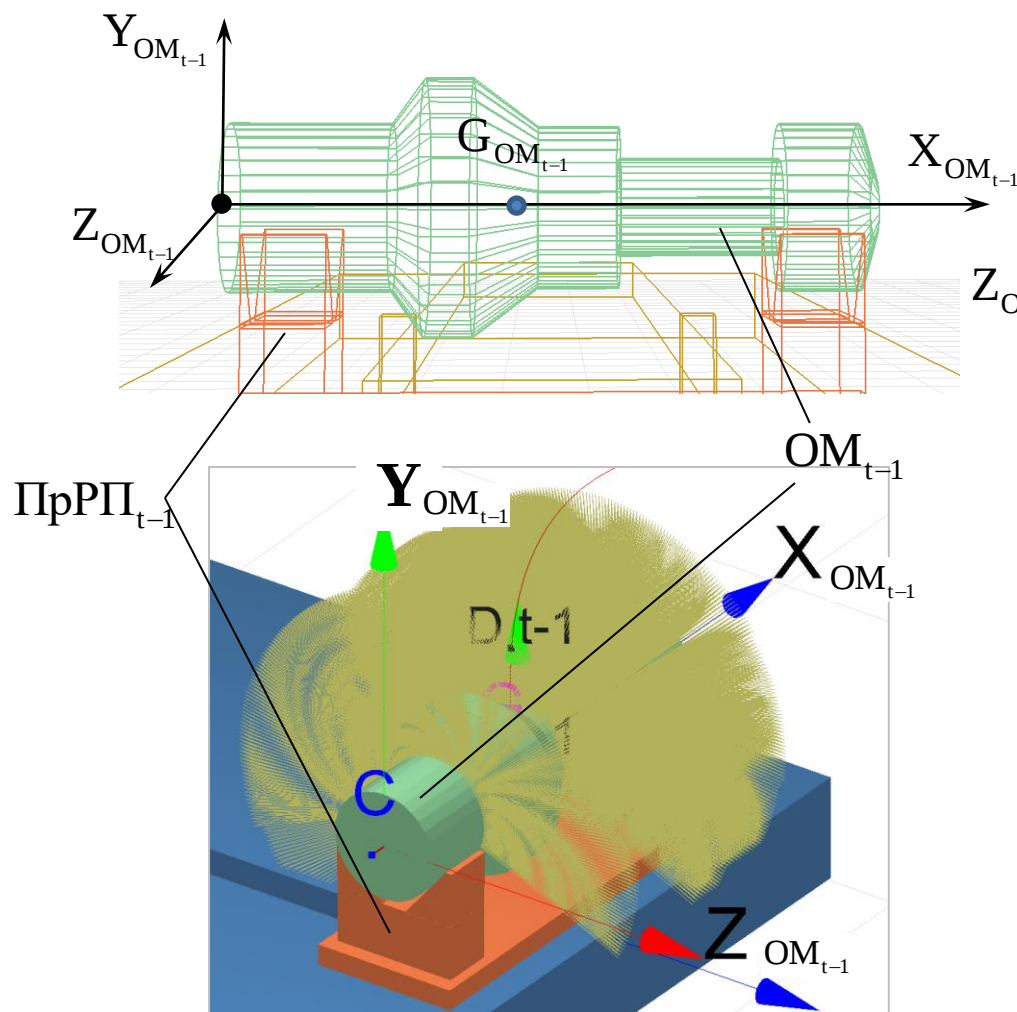
– МСПР мод.: KUKA KR-30

$$(X_{OM_{t-1}}; Y_{OM_{t-1}}; Z_{OM_{t-1}})_{Var} \rightarrow (X_{OM_t}; Y_{OM_t}; Z_{OM_t})_{Var}$$

THE RESEARCHING PARAMETERS OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISION TRAJECTORIES

Технологічні параметри сервісу: кутові (КПС - **ASP**) та лінійні (ЛПС - **LSP**)

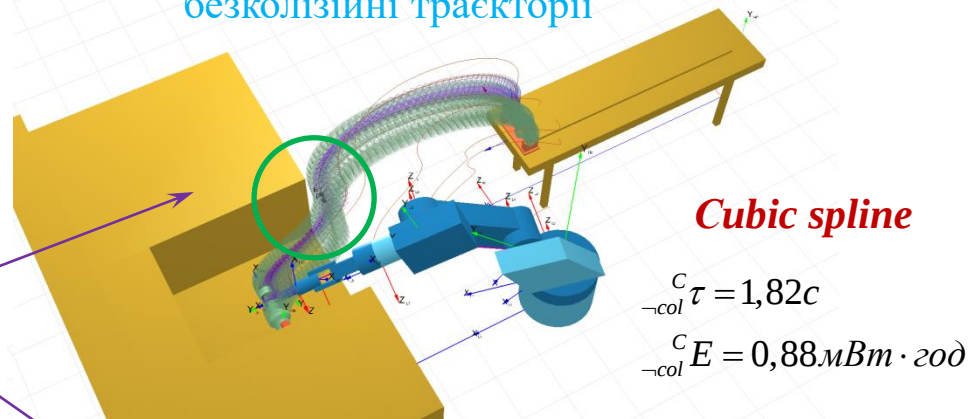
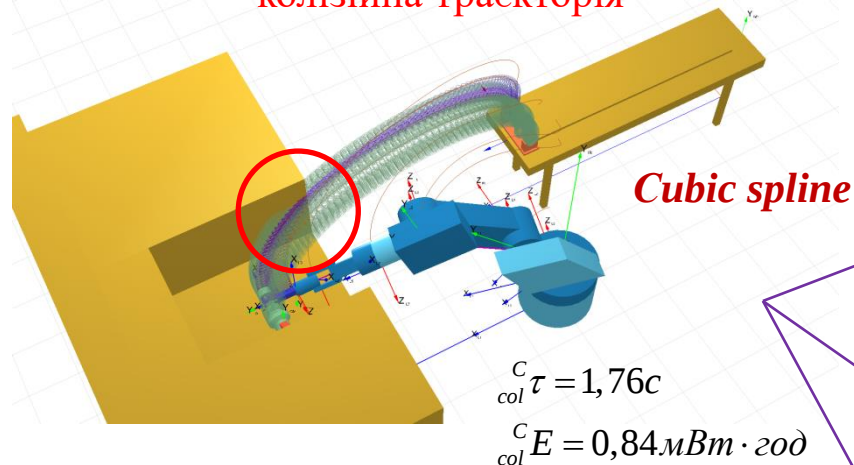
Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$
 $\leftarrow OM_t$



EXAMPLE OF THE COLLISIONAL TRAJECTORIES CORRECTION BY SPLINES (for analyzed example on slide 63)

колізійна траєкторія

безколізійні траєкторії

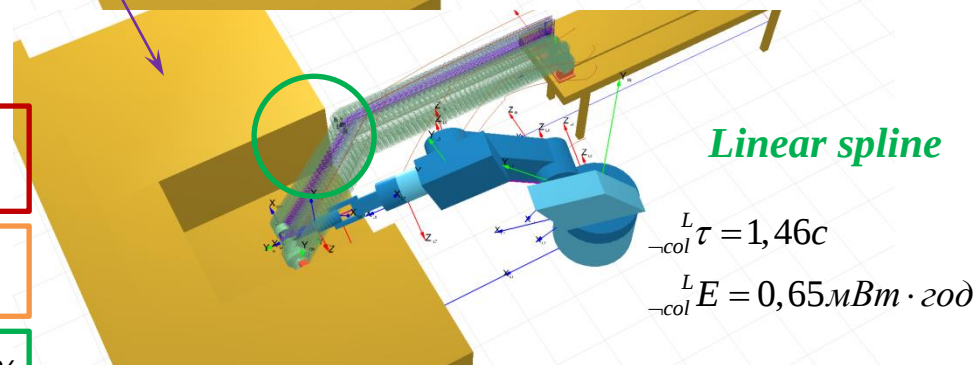
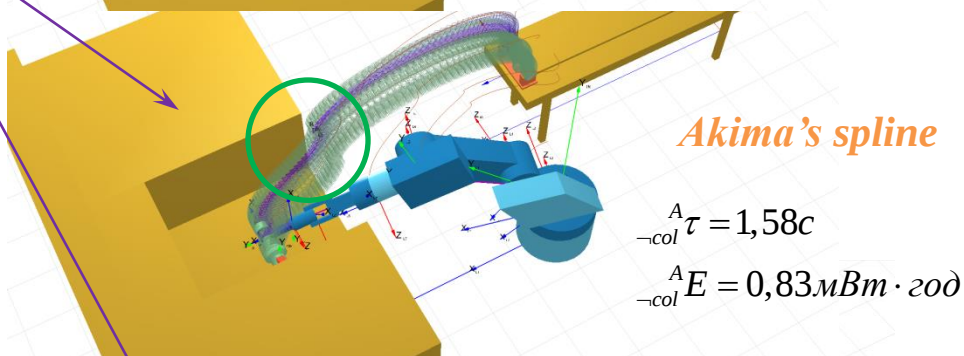


ЛПС = [0, 1, 2, ..., 235, **236**, 237, ..., 398, 399, 400]

КПС = [0, 1, 2, ..., 332, **333**, 334, ..., 358, 359, 360]

$P_{3ППР} = 206,16 \text{ мм}$

$J_{3ППР} = 0,18 \text{ (локальний час)}$



$$\xi_{c_\tau} = \frac{1,82 - 1,76}{1,76} \cdot 100\% = 3,4\% \quad \xi_{c_E} = \frac{0,88 - 0,84}{0,84} \cdot 100\% = 4,8\%$$

$$\xi_{A_\tau} = \frac{1,58 - 1,76}{1,76} \cdot 100\% = -10,2\% \quad \xi_{A_E} = \frac{0,83 - 0,84}{0,84} \cdot 100\% = -1,2\%$$

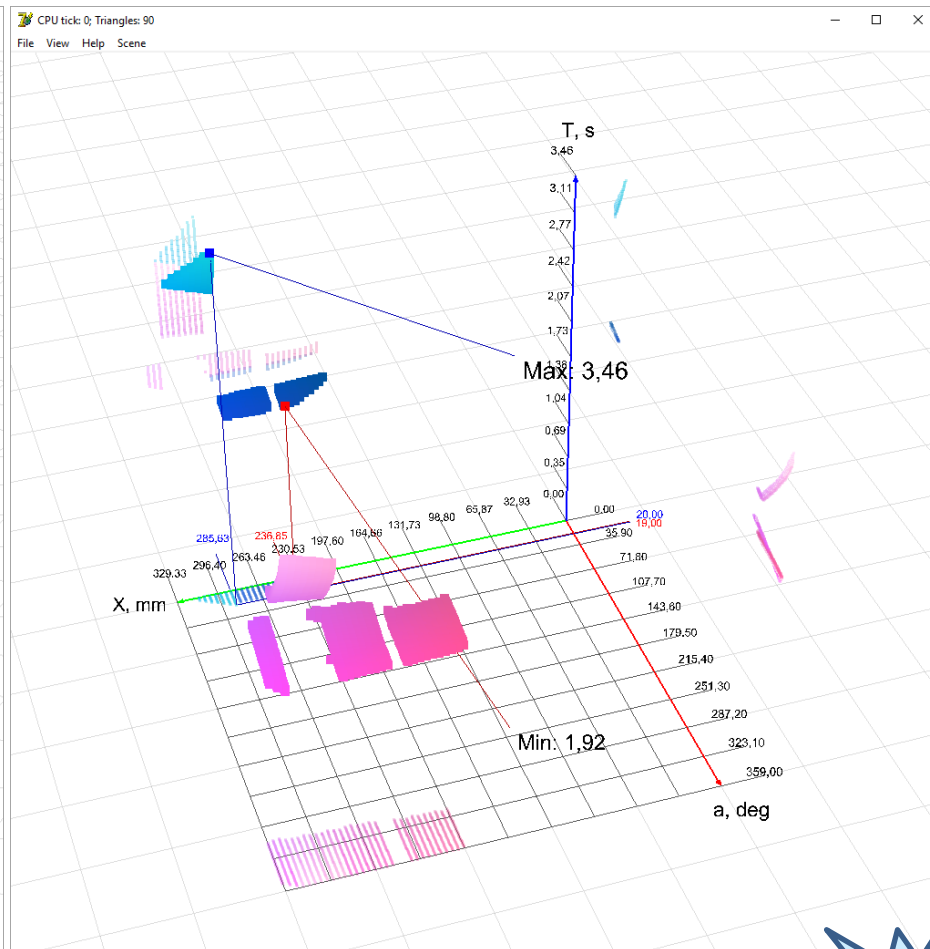
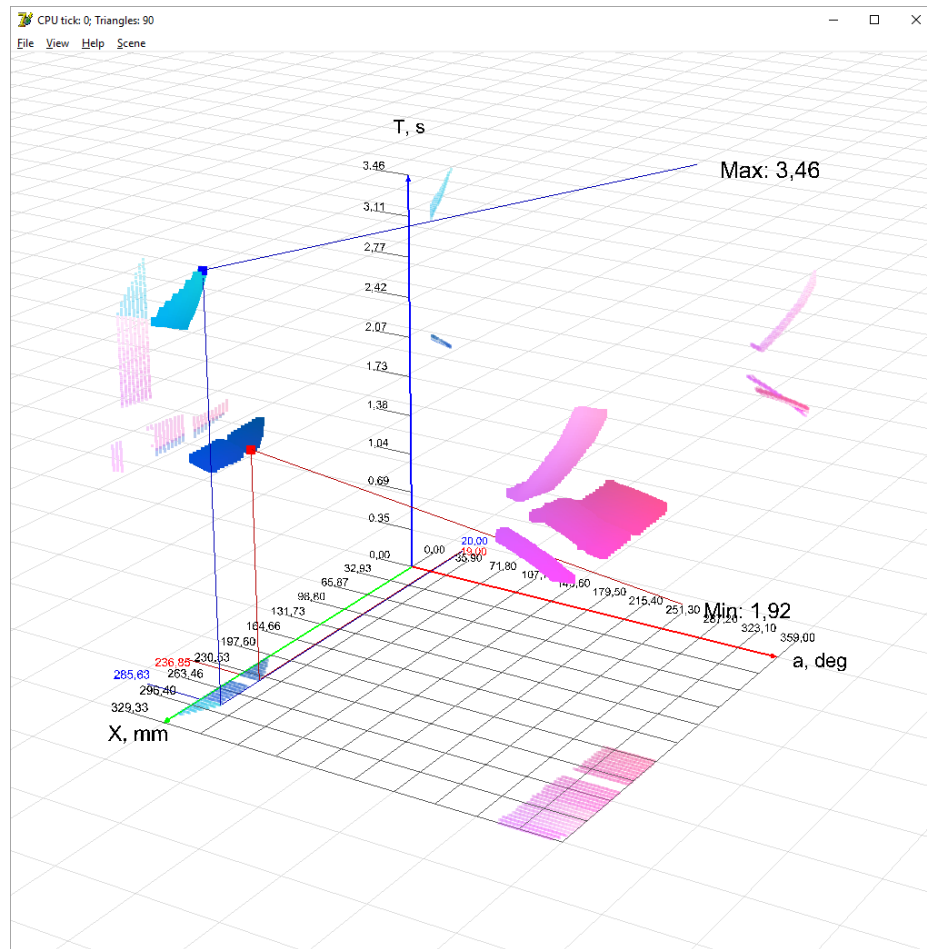
$$\xi_{L_\tau} = \frac{1,46 - 1,76}{1,76} \cdot 100\% = -17,1\% \quad \xi_{L_E} = \frac{0,65 - 0,84}{0,84} \cdot 100\% = -22,6\%$$

THE RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: **швидкість** відпрацювання траєкторії (τ , с)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: **Cubic**

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$
 $\leftarrow OM_t$

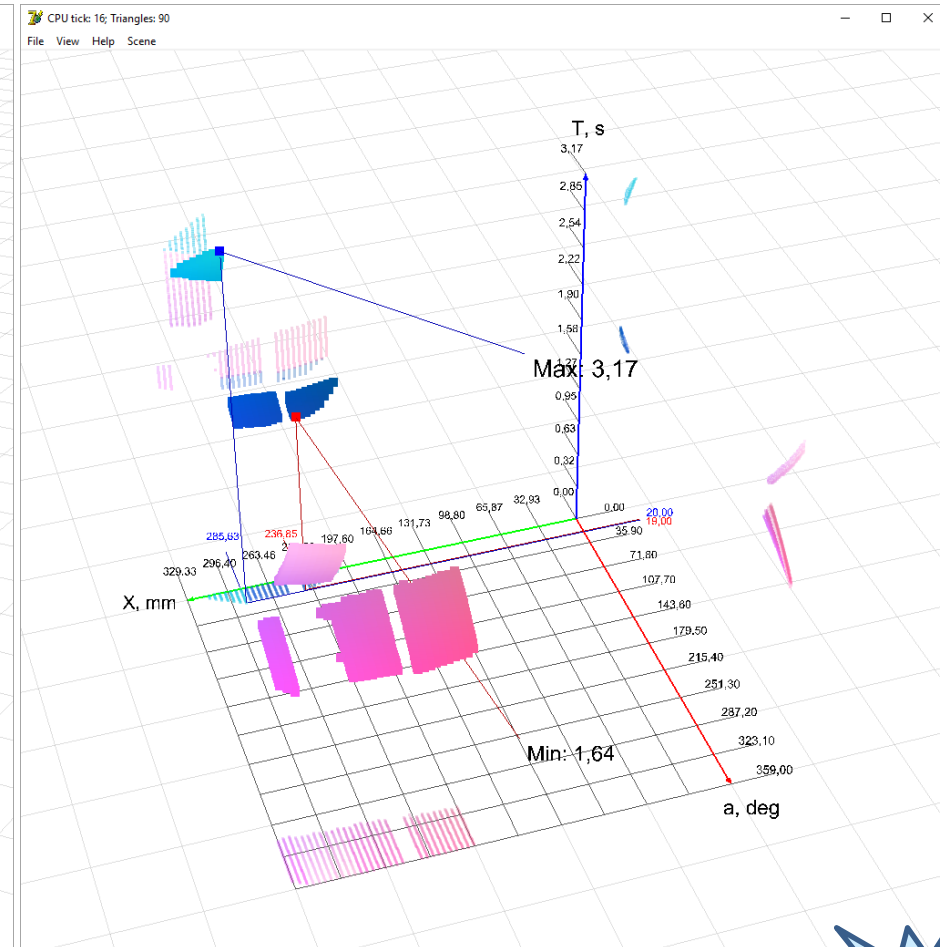
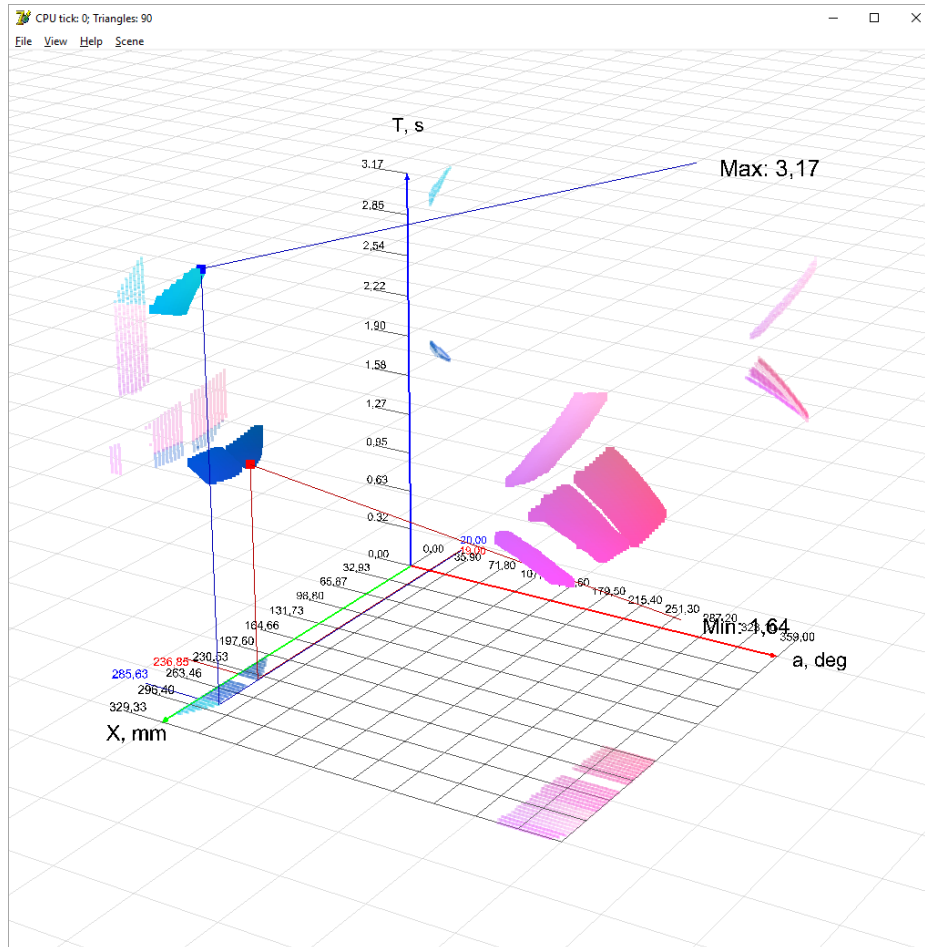


RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: **швидкість** відпрацювання траєкторії (τ , с)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: **Akima**

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$
 $\leftarrow OM_t$

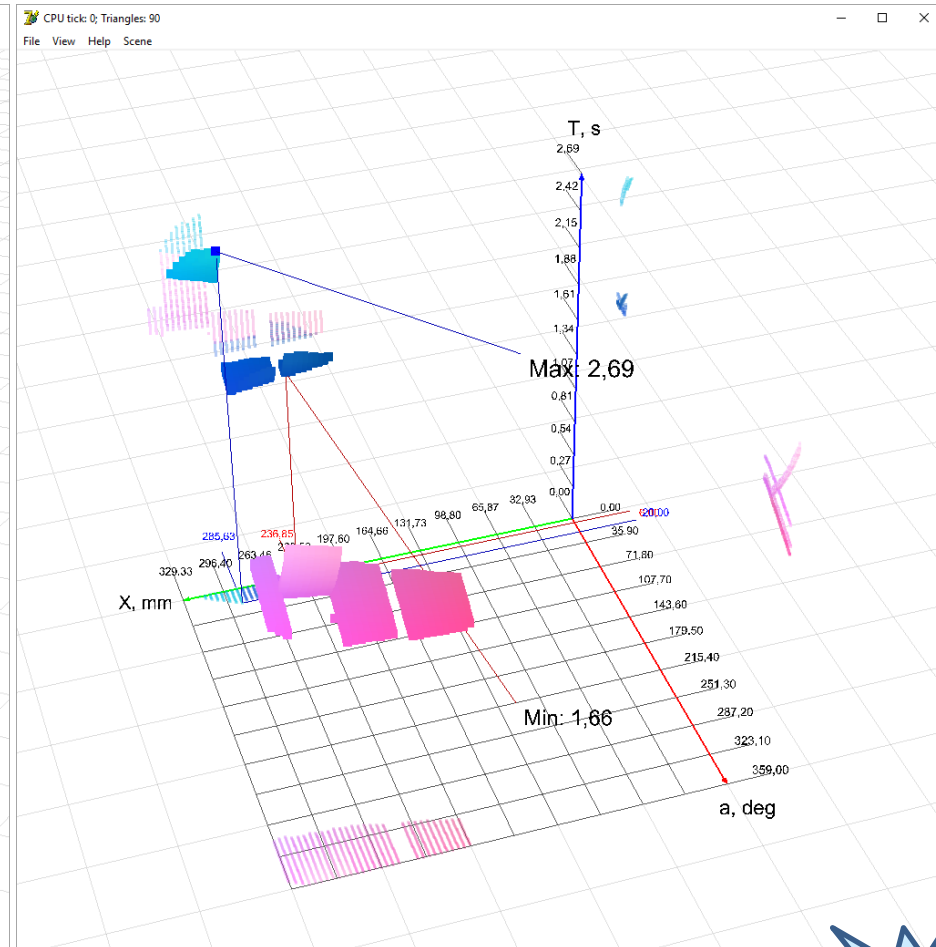
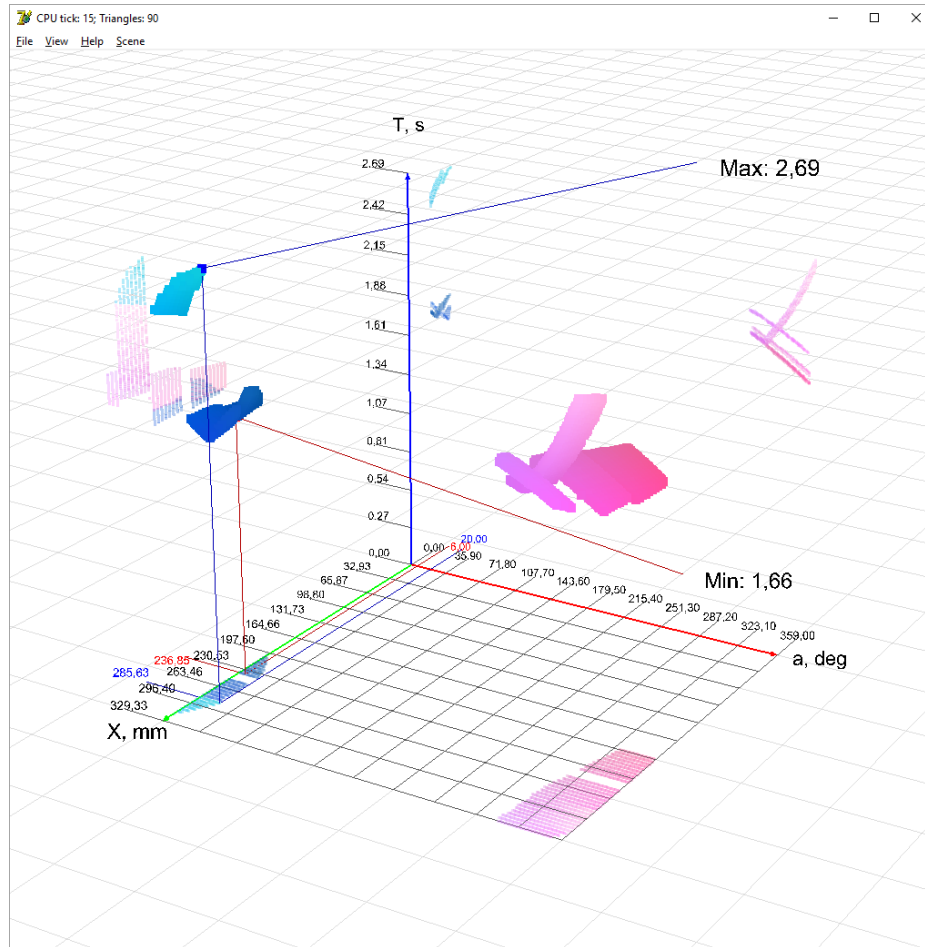


RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: **швидкість** відпрацювання траєкторії (τ , c)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: **Linear**

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$
 $\leftarrow OM_t$



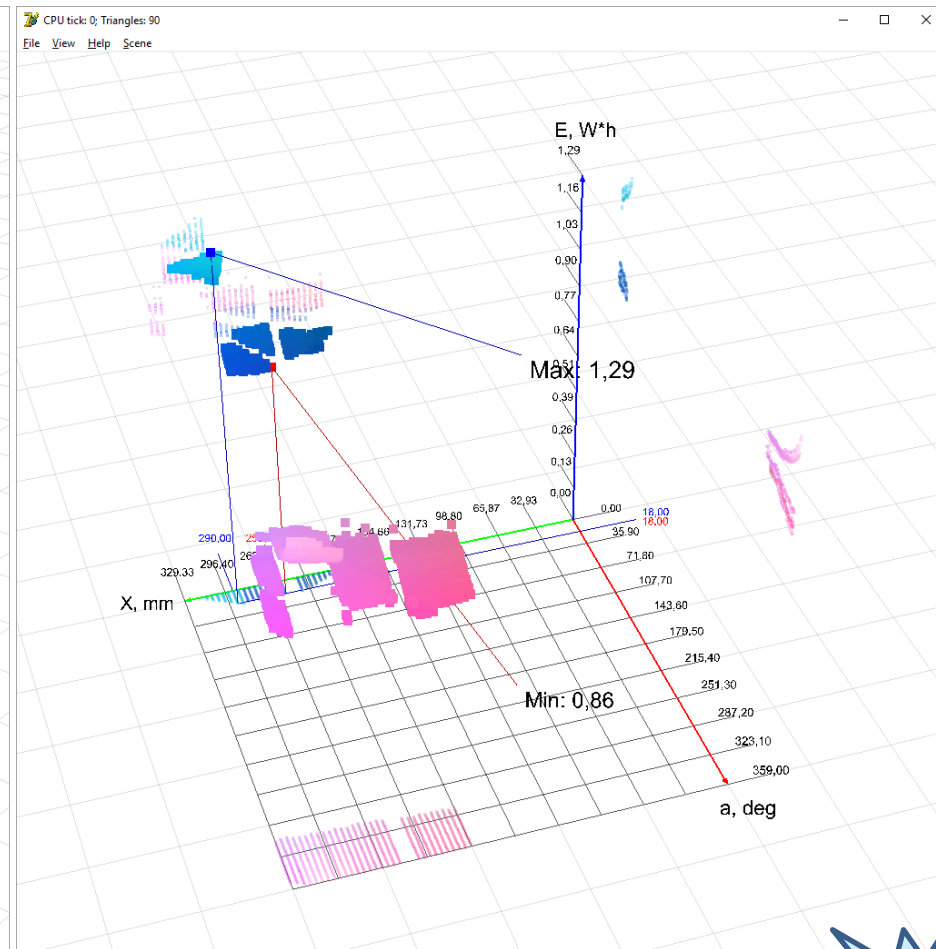
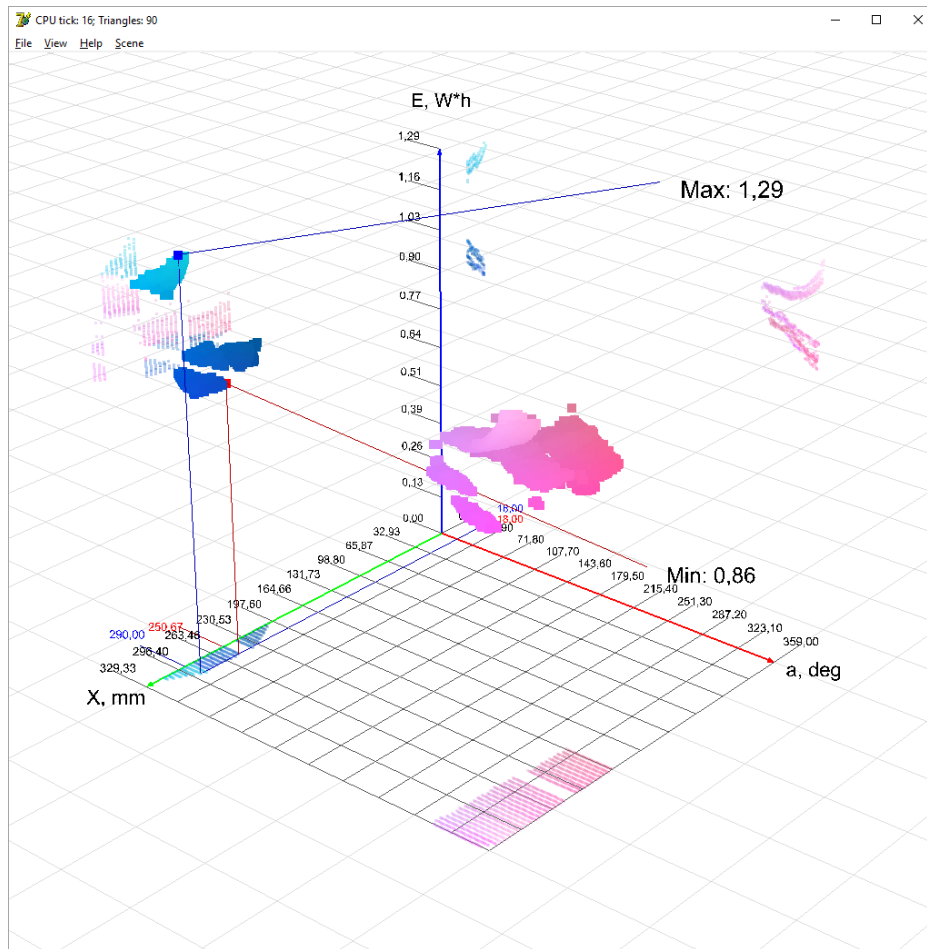
RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES

(for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: **енергоємність** (Е, Вт · год)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: **Cubic**

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$
 $\leftarrow OM_t$



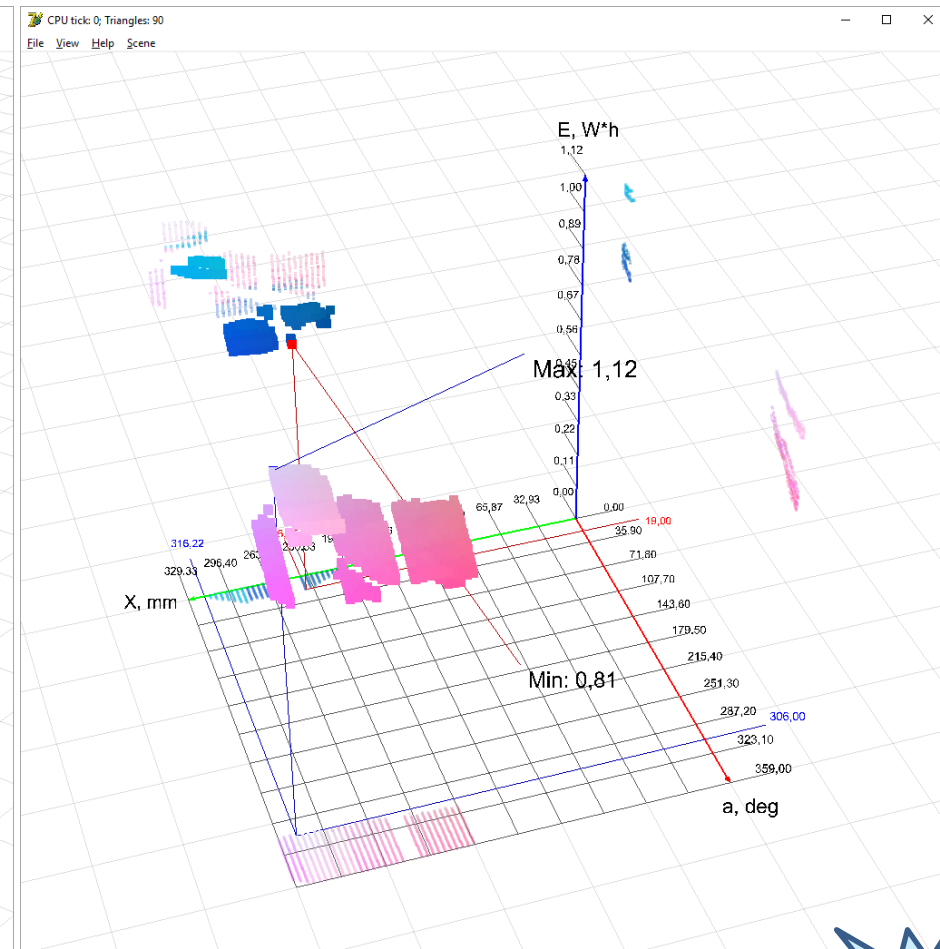
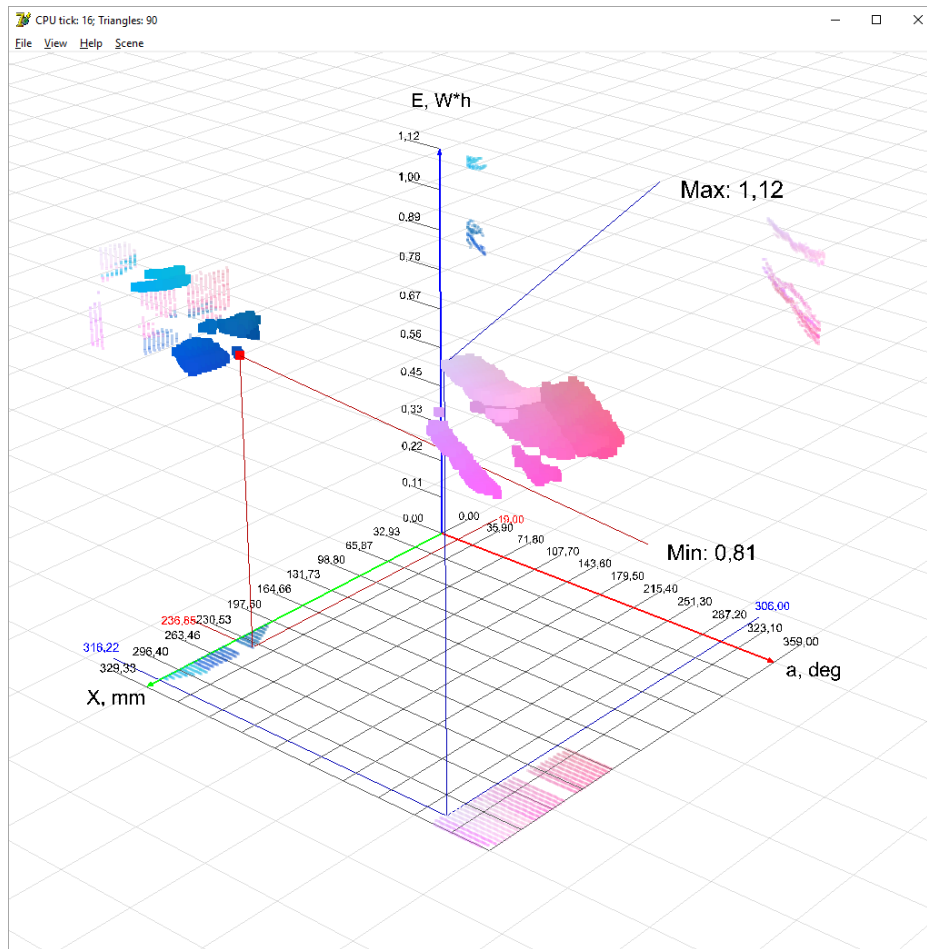
RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES

(for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: **енергоємність** (Е, Вт · год)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: **Akima**

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$
 $\leftarrow OM_t$

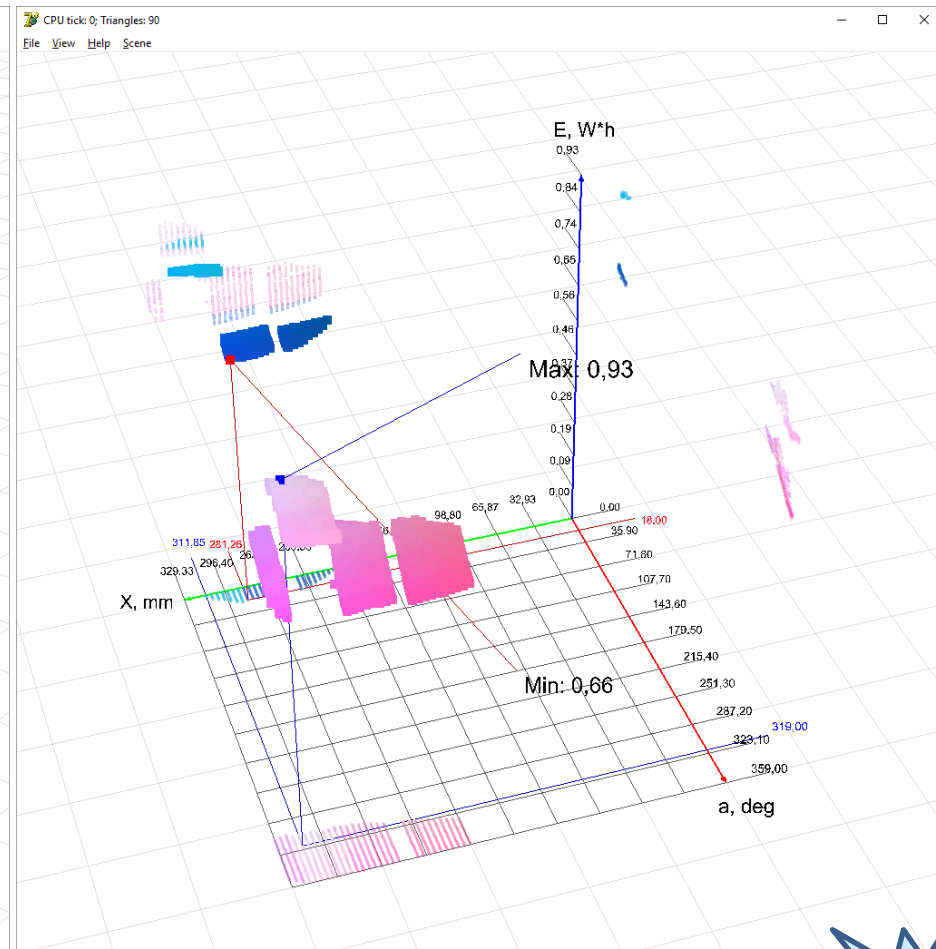
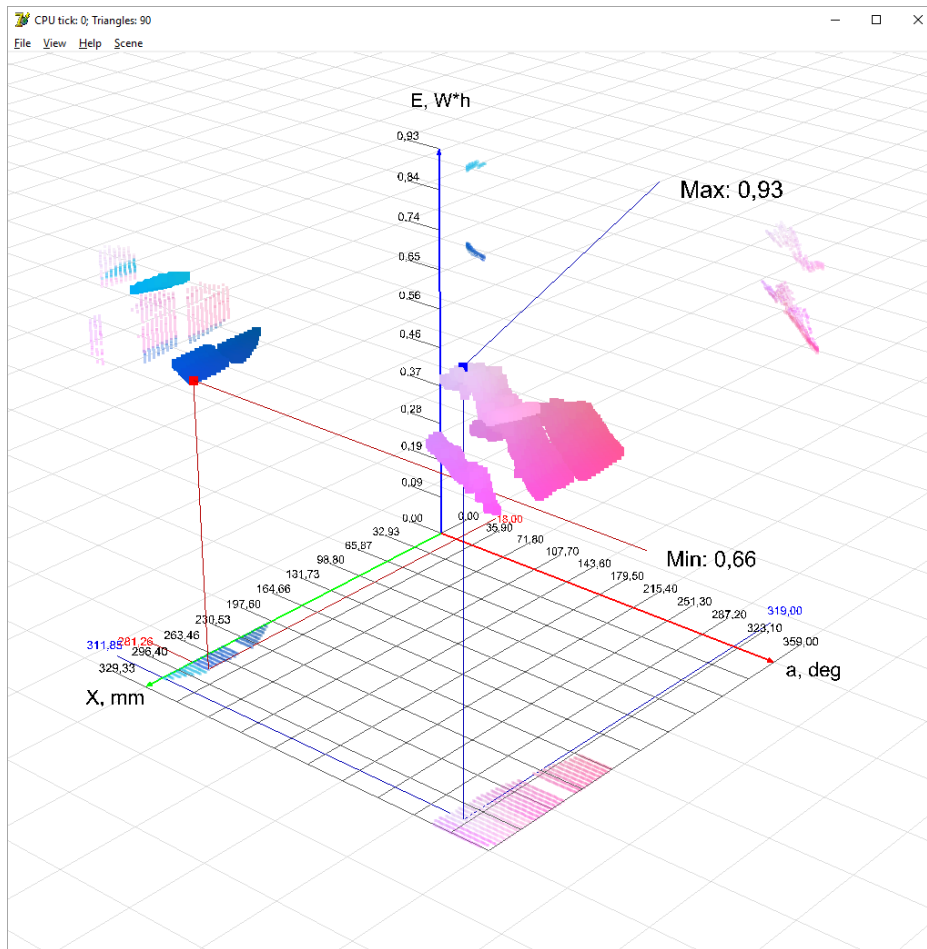


RESEARCHING OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63)

Досліджуваний параметр: **енергоємність** (Е, Вт · год)

Сплайн згладжування траєкторії полюса ЗППР: **Linear**

Розташування СК ОМ: $\leftarrow OM_{t-1}$
 $\leftarrow OM_t$



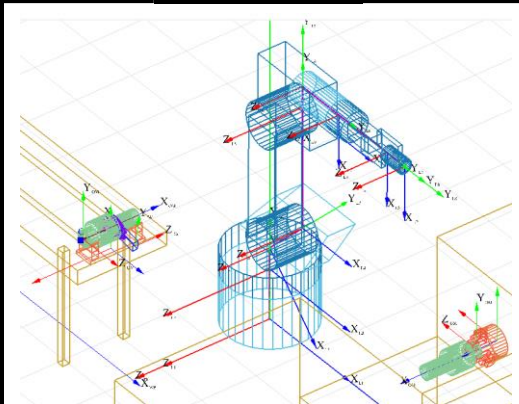
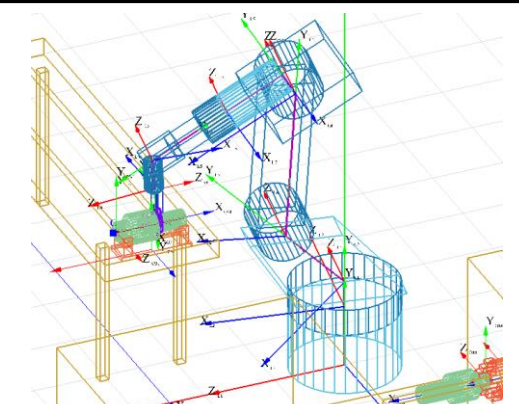
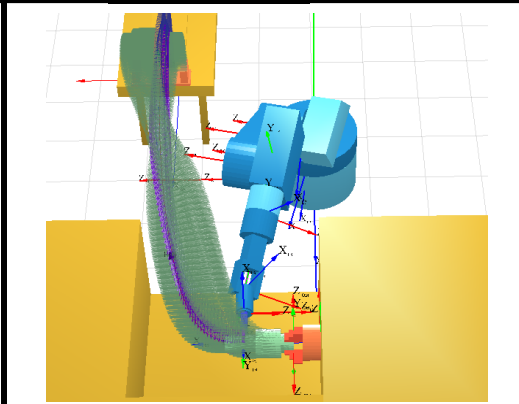
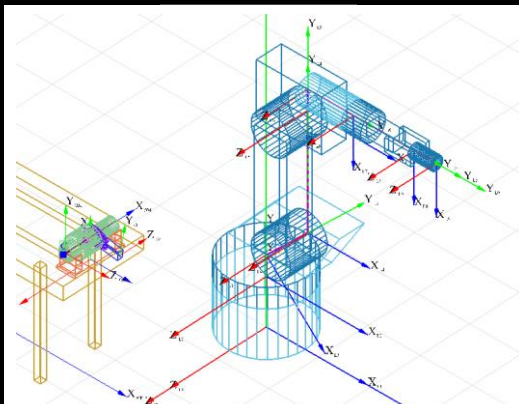
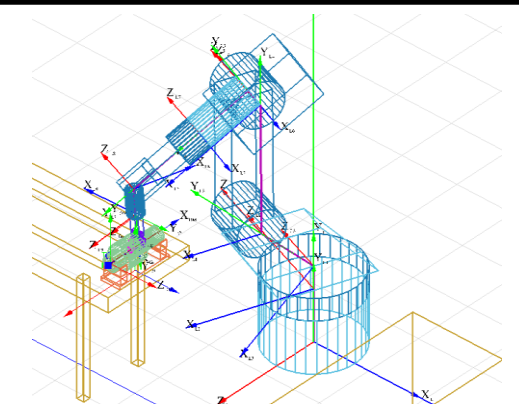
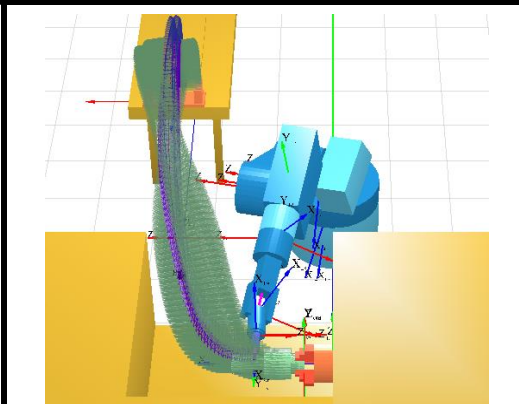
GENERALIZED RESULTS OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES (for analyzed example on slide 63, stage E1)

Сплайн	Досліджуваний параметр		Умови за слайдами 62,63 ($i = \overline{1,12}$; $spl = (C, A, L)$)							
			$OM_{t-1} / OM_t : \searrow / \rightarrow$ (№7)				$OM_{t-1} / OM_t : \searrow / \leftarrow$ (№8)			
			$F_{OPT}^* = \tau_{MIN7}$				$F_{OPT}^* = E_{MIN8}$			
			τ, c	$E, мВт \cdot год$	$КПС, ^\circ$	$ЛПС, мм$	τ, c	$E, мВт \cdot год$	$КПС, ^\circ$	$ЛПС, мм$
Cubic	τ_{min}		1,7796	0,9118	318	290	1,7459	0,8579	320	236,85
		τ_{max}	1,9934	0,9051	2	197,52	2,1776	0,9939	5	76,22
	E_{min}		1,8563	0,8644	333	307,48	1,7564	0,8569	322	236,85
		E_{max}	1,7927	0,9612	320	236,85	2,0012	1,0262	330	89,33
Akima	τ_{min}		1,5678	0,8089	327	329,33	1,5638	0,8191	320	236,85
		τ_{max}	1,7337	0,839	2	197,52	2,0753	0,8805	5	76,22
	E_{min}		1,6186	0,7902	339	329,33	1,5737	0,8097	327	236,85
		E_{max}	1,6099	0,9075	339	201,89	1,9185	0,9334	343	80,59
Linear	τ_{min}		1,3024	0,6694	323	316,22	1,4174	0,7383	326	76,22
		τ_{max}	1,9972	0,7135	0	329,33	2,1515	0,7826	5	76,22
	E_{min}		1,5129	0,6534	316	329,33	1,4895	0,6488	333	236,85
		E_{max}	1,9972	0,7135	0	329,33	2,1515	0,7826	5	76,22

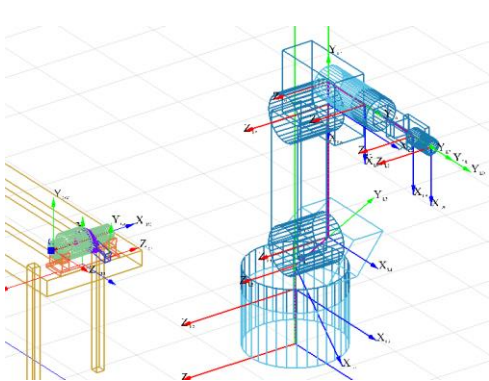
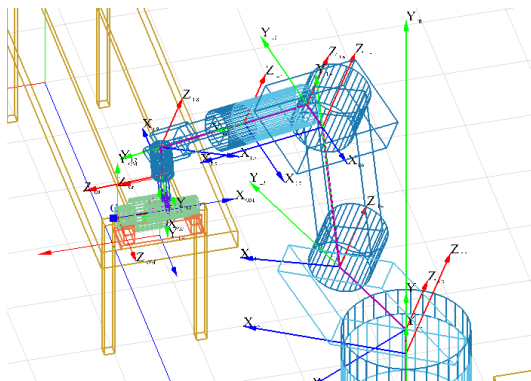
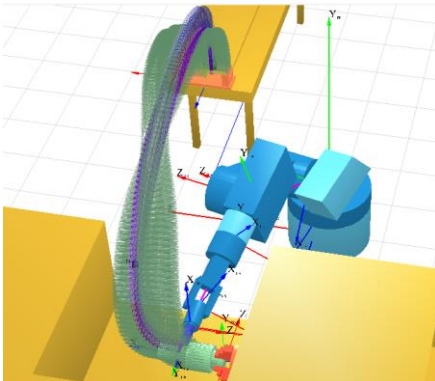
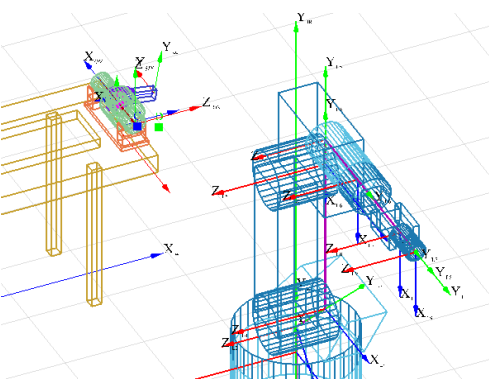
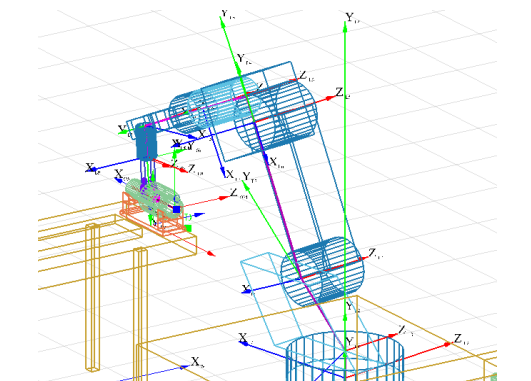
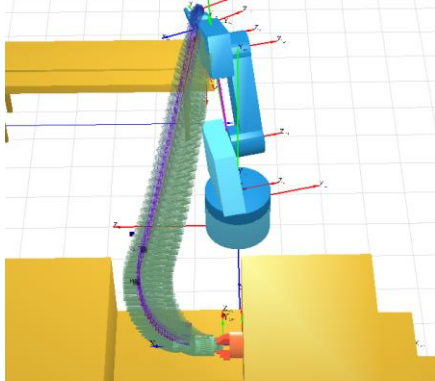
$$F_{opt}^* = \left({}^L \tau_{min_7} \right) \in \left({}^{Spl} \tau_{min_i} \mid i = \overline{1,12}; spl = (C, A, L) \right)$$

$$F_{opt}^* = \left({}^L E_{min_8} \right) \in \left({}^{Spl} E_{min_i} \mid i = \overline{1,12}; spl = (C, A, L) \right)$$

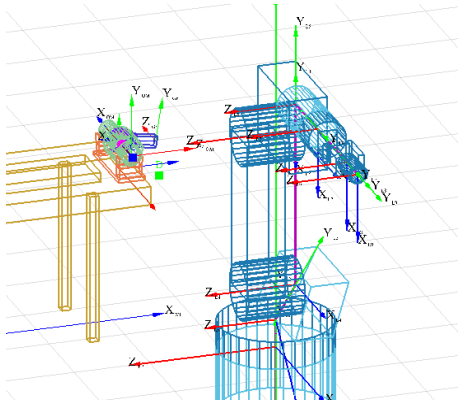
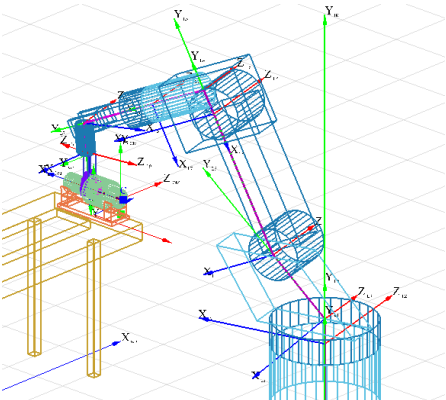
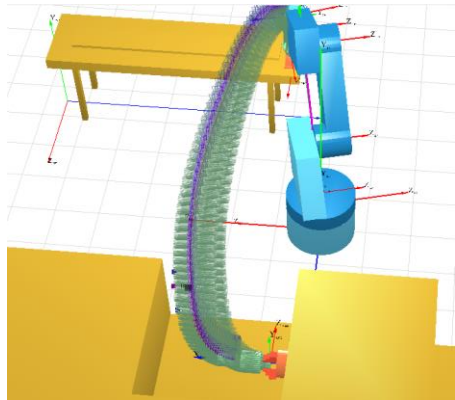
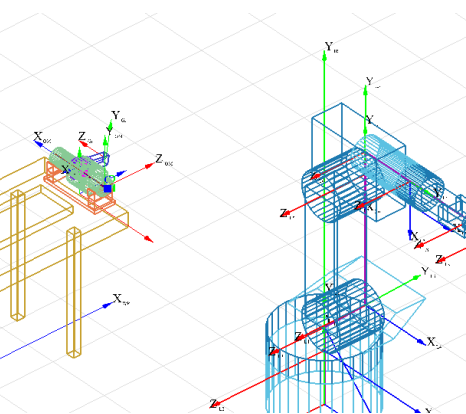
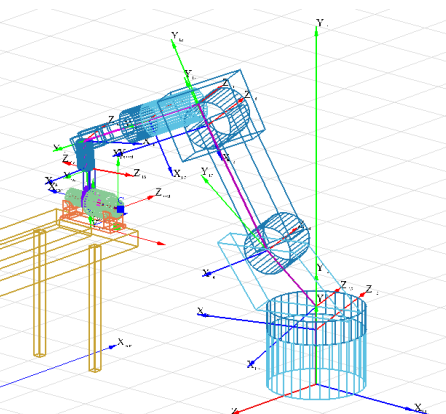
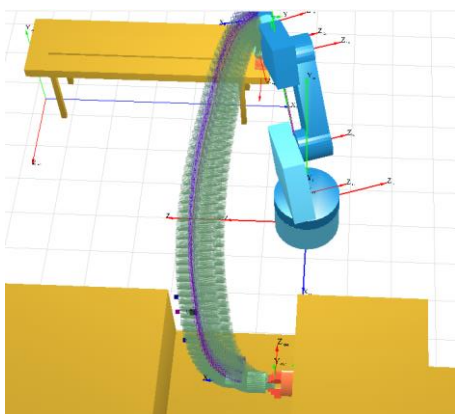
CALCULATIONS OF TRAJECTORIES IN DEVELOPED "Robix" SOFTWARE

N з/п	СК РП _{t-1} відносно СКПР			Побудована траєкторія		
	Координати, що визначають ЛПС			Орієнтація, що визначає КПС	Технологічні характеристики траєкторії	
	X _{РП_{t-1}} ^{ПР}	Y _{РП_{t-1}} ^{ПР}	Z _{РП_{t-1}} ^{ПР}	∠(СК РП _{t-1} ∧ СК ПР)	Час, с	Потужність, mW Енеогоємність, mW*h
1	-2400	0	1000	0	2,0216	1419,7 0,5729
						
2	-2600	0	1000	0	1,8938	1635,21 0,8602
						

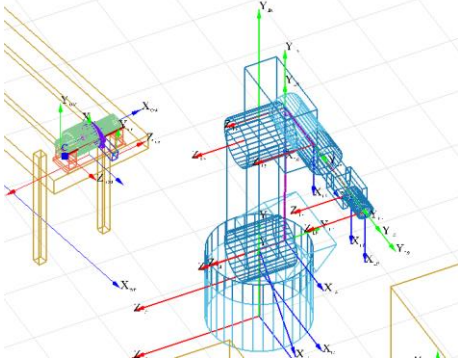
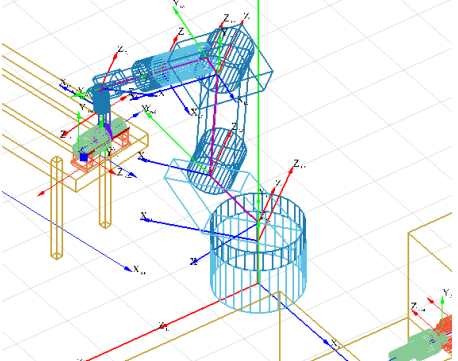
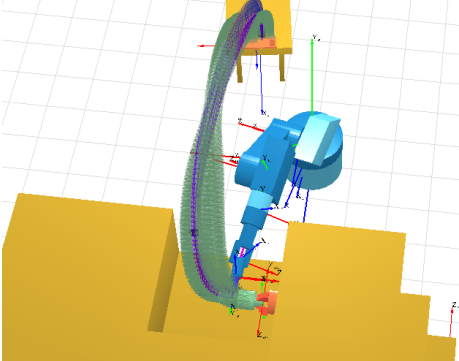
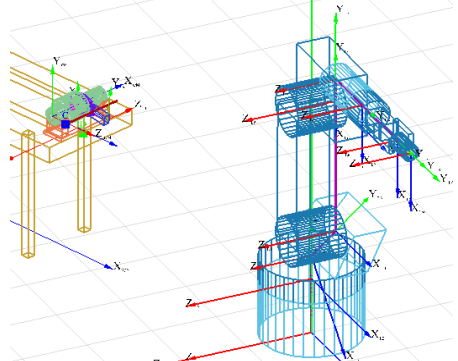
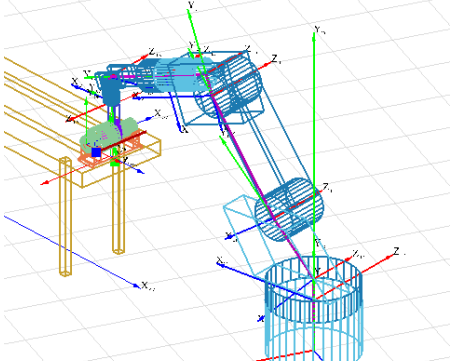
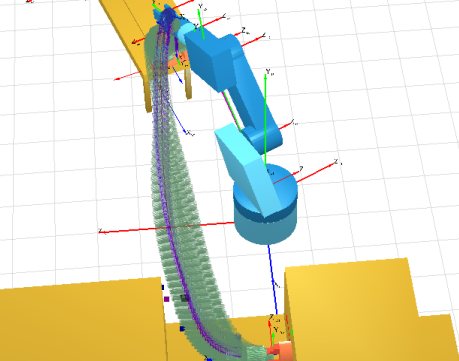
CALCULATIONS OF TRAJECTORIES IN DEVELOPED "Robix" SOFTWARE

N з/п	СК РП _{t-1} відносно СКПР			Побудована траєкторія			
	Координати, що визначають ЛПС			Орієнтація, що визначає КПС	Технологічні характеристики траєкторії		
	X _{РП_{t-1}} ^{ПР}	Y _{РП_{t-1}} ^{ПР}	Z _{РП_{t-1}} ^{ПР}	∠(СК РП _{t-1} ∧ СК ПР)	Час, с	Потужність, mW	Енергоємність, mW*h
3	-2800	0	1000	0	2,0634	1635,21	0,9372
							
4	-1400	0	2500	-90	6,0341	1392,27	2,3336
							

CALCULATIONS OF TRAJECTORIES IN DEVELOPED "Robix" SOFTWARE

N з/п	СК РП _{t-1} відносно СКПР				Побудована траєкторія		
	Координати, що визначає ЛПС			Орієнтація, що визначає КПС	Технологічні характеристики траєкторії		
	$X_{РП_{t-1}}^{PP}$	$Y_{РП_{t-1}}^{PP}$	$Z_{РП_{t-1}}^{PP}$	$\angle(СК РП_{t-1} \wedge СК ПР)$	Час, с	Потужність, mW	Енергоємність, mW*h
5	-1400	0	2600	-90	3,5754	1829,6	1,8171
							
6	-1400	0	2700	-90	3,3418	1993,03	1,8501
							

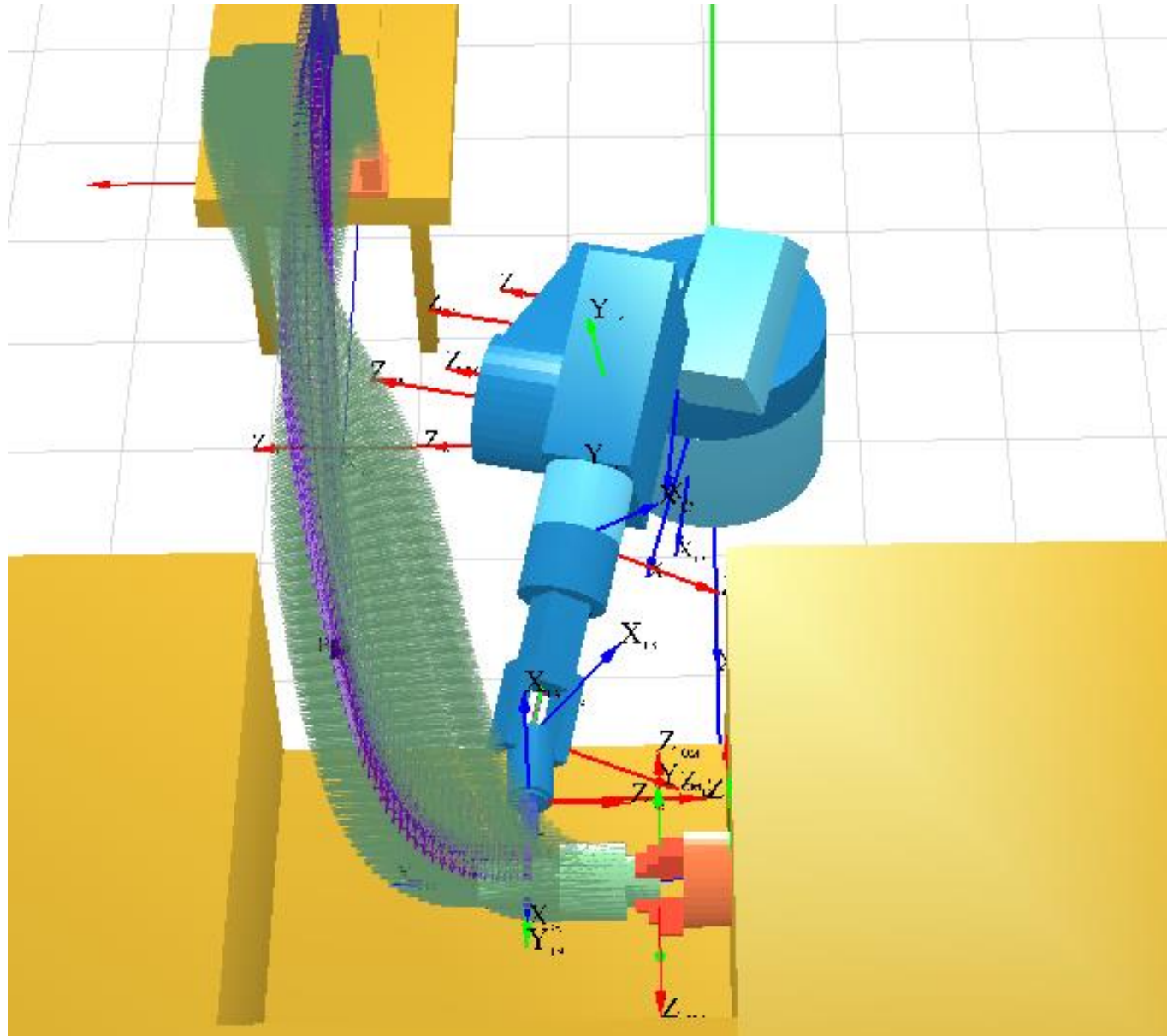
CALCULATIONS OF TRAJECTORIES IN DEVELOPED "Robix" SOFTWARE

N з/п	СК РП _{t-1} відносно СКПР				Побудована траєкторія		
	Координати, що визначають ЛПС			Орієнтація, що визначає КПС	Технологічні характеристики траєкторії		
	$X_{РП_{t-1}}^{PP}$	$Y_{РП_{t-1}}^{PP}$	$Z_{РП_{t-1}}^{PP}$	$\angle(СК РП_{t-1} \wedge СК ПР)$	Час, с	Потужність, mW	Енергоємність, mW*h
7	-3000	0	1000	-15	2,8973	1663,74	1,3306
							
8	-3500	0	1500	-30	3,0886	2339,08	2,0088
							

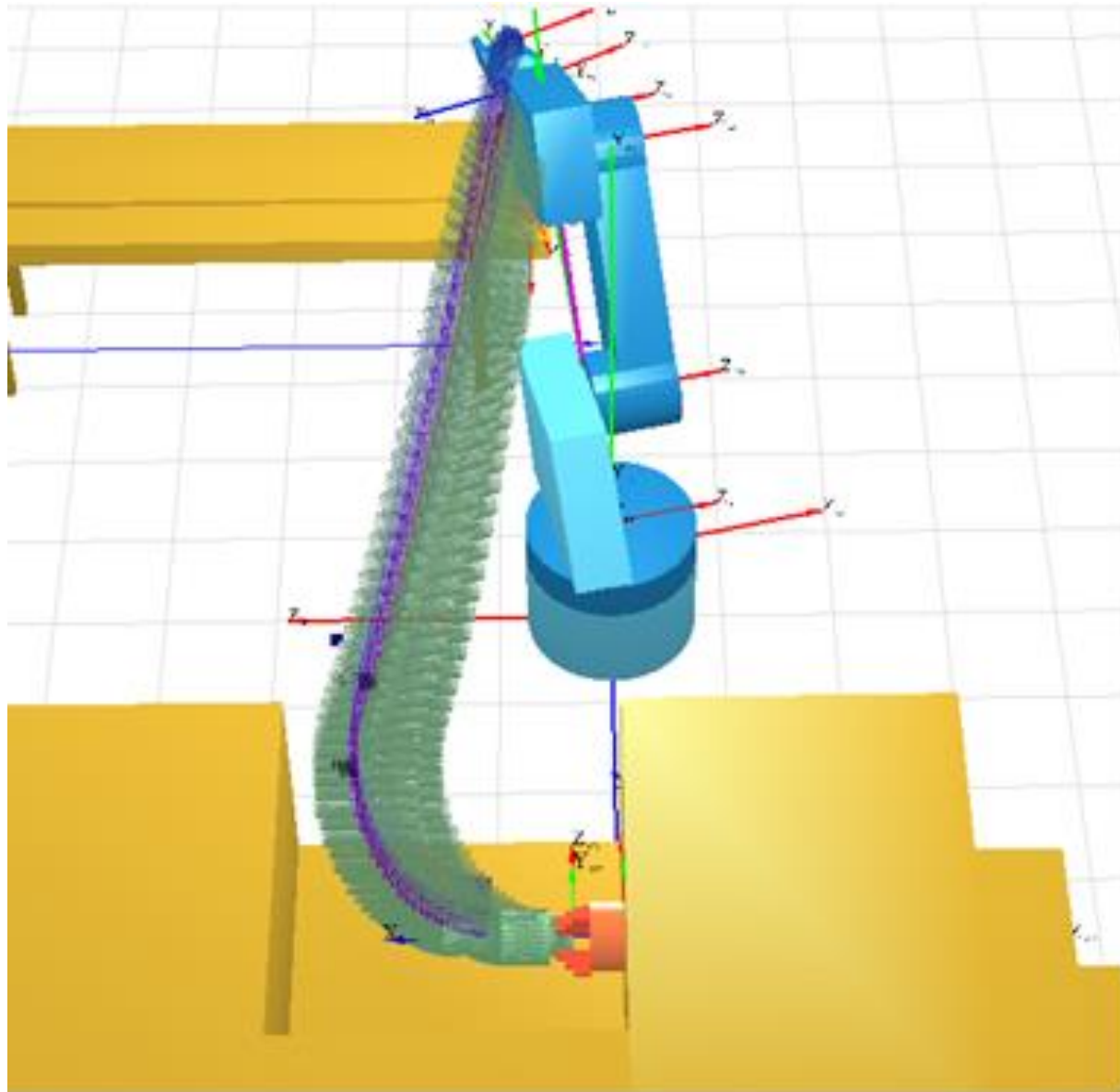
CALCULATION RESULTS

№ з/п	Час τ, с	Потужність, Р, mW	Енергоємність, Е, mW*h
1	0,7972	1419,7	0,5729
2	1,8938	1635,21	0,8602
3	2,0634	1635,21	0,9372
4	6.0341	1392,27	2,3336
5	3,5754	1829,6	1,8171
6	3,3418	1993,03	1,8501
7	2,8973	1663,74	1,3306
8	3,0886	2339,08	2,0088
	$\xi_{\tau} = \frac{0.7972}{6.0341} * 100 = 761\%$	$\xi_P = \frac{2339.08}{1392.27} * 100$ = 168%	$\xi_P = \frac{2.3336}{0.5729} * 100$ = 407%

GRAPHIC ILLUSTRATION OF OPTIMAL MUTUAL LOCALIZATION OF WORK POSITION AND INDUSTRIAL ROBOT IN TIME AND ENERGY



GRAPHIC ILLUSTRATION OF NON OPTIMAL MUTUAL LOCALIZATION OF WORK POSITION AND INDUSTRIAL ROBOT IN TIME AND ENERGY

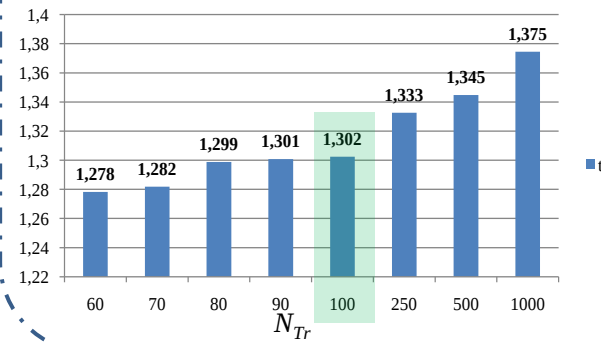


THE ILLUSTRATION OF PROPOSED 3-STAGED METHOD FOR NONCOLLISIONAL TRAJECTORY GENERATION

The calculated values of F^*_{opt} by stages E1, E2, E3, block A3 (slide 10)

Eman 1

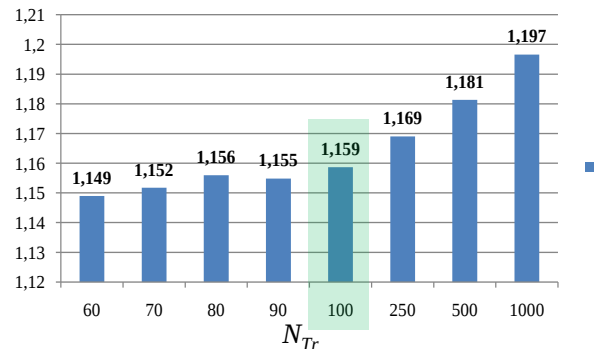
$E1^L \tau, c$



Eman 2

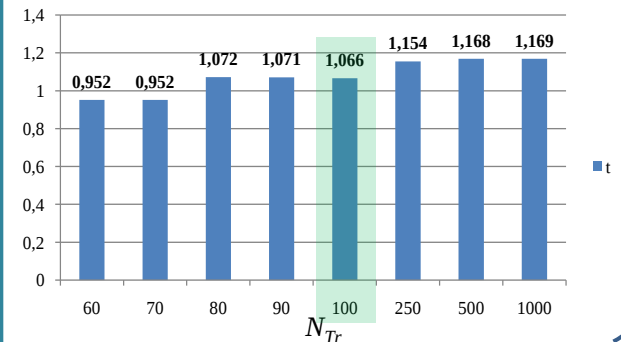
$$F^*_{opt} = \tau_{min}$$

$E2^L \tau, c$



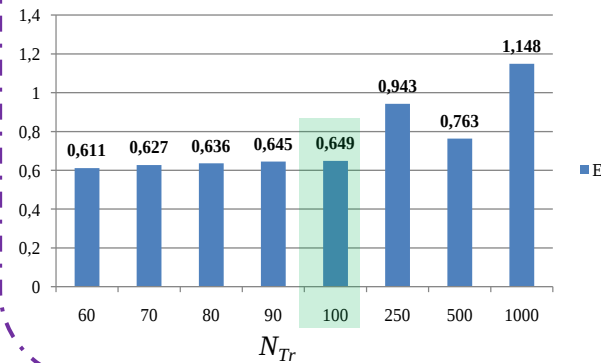
Eman 3

$E3^L \tau, c$

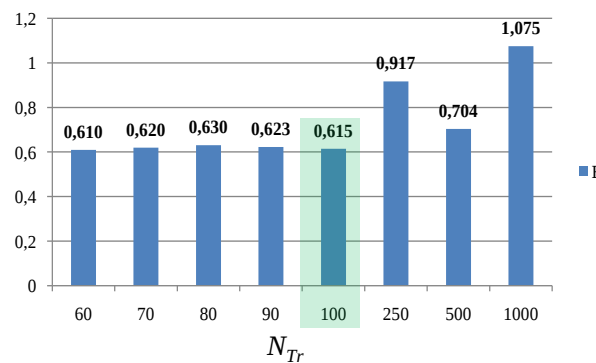


$$F^*_{opt} = E_{min}$$

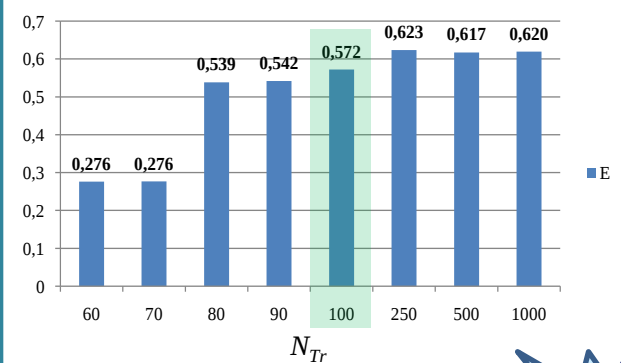
$E1^L E, Bm \cdot 200$



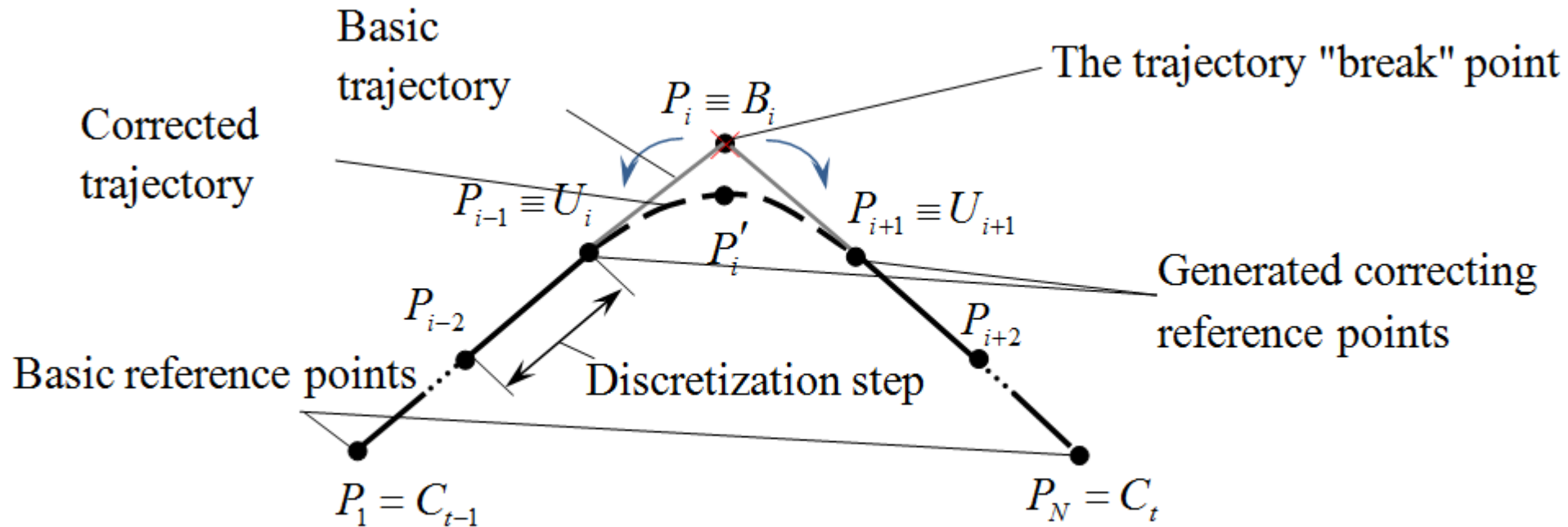
$E2^L E, Bm \cdot 200$



$E3^L E, Bm \cdot 200$



TRAJECTORY SMOOTHING SCHEME (STAGE 2)



GENERALIZED RESULTS OF GRIPPERS' INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION FOR CORRECTED NONCOLLISIONAL TRAJECTORIES

Comparison table of received results of linear-spline based trajectory (slides 71, 72)

Етапи	Досліджуваний параметр при $N_{Tr} = 100$							
	$F_{OPT}^* = \tau_{MIN}$				$F_{OPT}^* = E_{MIN}$			
	τ, c	$\zeta_\tau, \%$	$E, \text{мВт} \cdot \text{год}$	$\zeta_E, \%$	τ, c	$\zeta_\tau, \%$	$E, \text{мВт} \cdot \text{год}$	$\zeta_E, \%$
E1	1,302	—	0,669	—	1,489	—	0,649	—
E2	1,159	12,338	0,660	1,364	1,100	35,363	0,615	5,528
E3	1,066	22,138	0,604	10,761	1,070	35,701	0,572	13,462

$$\Delta_\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min}$$

$$\Delta_E = E_{\max} - E_{\min}$$

$$\zeta_E = \frac{\Delta_E}{E_{\min}} \cdot 100\%$$

$$\zeta_\tau = \frac{\Delta_\tau}{\tau_{\min}} \cdot 100\%$$