

**Ж. Т. ЖУМАШЕВА*, Б. М. САГИТЖАНОВ, С. Э. ТӨЛЕНОВ, Е. Н. ЖОЛДАСОВ,
А. М. ТОЛЕУШОВА, Н. Қ. ДОСМАҒАМБЕТ, З. А. РАХМАТУЛЛА**

Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

**E- mail: zhadyra_14@mail.ru*

СТРУКТУРНО – ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ДВУМЯ СХВАТАМИ

Жумашева Жадыра Токановна – и.о. профессора кафедры механики, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

E- mail: zhadyra_14@mail.ru

Сагитжанов Бирлик Майронович – магистр, докторант 3 курса по специальности «робототехнических систем», КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

E- mail: beriksagitzhanov94@gmail.com

Толенов Серик Асилханулы – магистр, докторант 3 курса по специальности «робототехнических систем», КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

E- mail: tolenov.serik@mail.ru

Жолдасов Ернар Нурдосулы – магистр, предприниматель, Шымкент, Казахстан;

E- mail: jera.kz@mail.ru

Толешова Айда Медерханқызы – магистр, докторант 2 курса по специальности «робототехнических систем», КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

E- mail: aida71193@mail.ru

Досмағамбет Нұрдәулет Қайратұлы – магистр, докторант 2 курса по специальности «робототехнических систем», КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

E- mail: nurdauletdosmagambet@gmail.com

Рахматулла Заңғар Асқарұлы – магистр, докторант 1 курса по специальности «робототехнических систем», КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан.

E- mail: rakhmatulla.zanggar@gmail.com

В данной работе изложены методы структурно – параметрического синтеза параллельного манипулятора (ПМ) с двумя схватами, который может быть использован для перегрузочных операций между двумя соседними основными технологическими оборудованиями в технологической линии холодной штамповки. Данный ПМ сформирован соединением двух схватов (выходных объектов) со стойкой при помощи двух пассивных и одной негативной замыкающих кинематических цепей (ЗКЦ).

***Ключевое слово:** параллельный манипулятор с двумя схватами, структурно – параметрический синтез, Чебышевское и квадратическое приближения.*

**Ж. Т. ЖУМАШЕВА,* Б. М. САГИТЖАНОВ, С. Э. ТӨЛЕНОВ, Е. Н. ЖОЛДАСОВ,
А. М. ТОЛЕУШОВА, Н. Қ. ДОСМАҒАМБЕТ, З. А. РАХМАТУЛЛА**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

**E- mail: zhadyra_14@mail.ru*

Жұмашева Жадыра Тоқанқызы – механика кафедрасының профессорының м.а., әл-Фараби ат-ғы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан;

E - mail: zhadyra_14@mail.ru

Сағитжанов бірлік Майронұлы – “робототехникалық жүйелер” арнайы курсының магистрі, докторанты, ҚазҰУ. әл-Фараби, Алматы, Қазақстан;

E-mail: beriksagitghanov94@gmail.com

Толенов Серік Асилханұлы - “робототехникалық жүйелер” мамандығы бойынша 3 курс магистрі, докторанты, әл-Фараби ат-ғы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан;

E-mail: tolenov.serik@mail.ru

Ернар Нұрдосұлы Жолдасов-магистр, кәсіпкер, Шымкент, Қазақстан;

E-mail: jera.kz@mail.ru

Төлеушова Айда Медерханқызы-”робототехникалық жүйелер” арнайы курсының магистрі, 2 курс докторанты, әл-Фараби ат-ғы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан;

E-mail: aida71193@mail.ru

Досмағамбет Нұрдәулет Қайратұлы-”робототехникалық жүйелер” мамандығы бойынша 2 курс магистрі, докторанты, әл-Фараби ат-ғы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан;

E-mail: nurdauletdosmagambet@gmail.com

Рахматулла Заңғар Асқарұлы-магистр, әл-Фараби ат-ғы ҚазҰУ 1 курс докторанты, Алматы, Қазақстан.

E - mail: rakhmatulla.zanggar@gmail.com

Бұл жұмыста салқын штамптау өндірісінің желісіндегі екі көршілес негізгі технологиялық жабдық арасында тасымалдау операциялары үшін пайдаланылуы мүмкін екі қысқышы бар параллель манипулятордың (ПМ) құрылымдық-параметрлік синтезінің әдістері көрсетілген. Бұл ПМ екі ұстағышты (шығару объектілерін) екі пассивті және бір теріс жабылатын кинематикалық тізбектерді (CLC) пайдаланып тіреуішпен қосу арқылы қалыптасады.

Түйін сөздер: екі ұстағышы бар параллель манипулятор, құрылымдық-параметрлік синтез, Чебышев және квадраттық жуықтаулар.

**ZH. T. ZHUMASHEVA, * B. M. SAGITZHANOV, S. A. TOLENOV, E. N. ZHOLDASOV,
A. M. TOLEUSHOVA, N. K. DOSMAGAMBET, Z. A. RAHMATULLA**

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

**E- mail: zhadyra_14@mail.ru*

STRUCTURAL - PARAMETRIC SYNTHESIS OF A PARALLEL MANIPULATOR WITH TWO GRIPS

Zhumasheva Zhadira Tokanovna – Acting Professor of the Department of Mechanics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; E-mail: zhadyra_14@mail.ru **Sagitghanov Birlik Mayronovich** – Master’s degree, 3rd year doctoral student in the specialty of “Robotic systems”, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

E-mail: beriksagitghanov94@gmail.com

Tolenov Serik Asilkhanuly – Master’s degree, 3rd year doctoral student in the specialty “Robotic systems”, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

E-mail: tolenov.serik@mail.ru

Zholdasov Ernar Nurdosuly – Master’s degree, entrepreneur, Shymkent, Kazakhstan;

E-mail: jera.kz@mail.ru
Toleushova Aida Mederkhankyzy – Master’s degree, 2nd year doctoral student in the specialty of “Robotic systems”, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

E-mail: aida71193@mail.ru

Dosmagambet Nurdaulet Kayratuly – Master’s degree, 2nd year doctoral student in the specialty of “robotic systems”, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

E-mail: nurdauletdosmagambet@gmail.com

Rakhmatulla Zangar Askaruly – Master’s degree, 1st year doctoral student in the specialty “Robotic systems”, Al-Farabi Kazakh National University, Алматы, Kazakhstan.

E-mail: rakhmatulla.zangar@gmail.com

This paper describes the methods of structural-parametric synthesis of a parallel manipulator PM with two grippers, which can be used for reloading operations between two adjacent main technological equipment in a cold stamping technological line. This PM is formed by connecting two grippers end – effectors with a base using two passive and one negative closing kinematic chains (CKC).

Keywords: parallel manipulator with two grippers, structural-parametric synthesis, Chebyshev and least – square quadratic approximation.

Введение. В промышленности существуют технологические процессы, где необходимо одновременное или последовательное выполнение нескольких операций, например, в штамповочном производстве, погрузочно – разгрузочных операциях. Для одновременного или последовательного выполнения используются манипуляционные роботы со многими рабочими органами (схвататами).

В данной работе синтезируется ПМ с двумя схватами, который может быть использован для выполнения перегрузочных операций от одного технологического оборудования к другому. Этот ПМ с двумя рабочими органами заменяет два промышленных робота в существующей технологической линии холодной штамповки, и он принадлежит к ПМ класса RoboMech, работающий по заданным законам движений рабочих органов и приводов [1]. Замена двух промышленных роботов одним ПМ класса RoboMech с двумя рабочими органами упрощает систему управления, повышает производительность и надежность технологической линии.

В данной работе проводится структурно – параметрический синтез ПМ с двумя схватами на основе модульного используется модульный метод структурно-параметрического синтеза ПМ, согласно которому по заданным законам движений входных и выходных звеньев одновременно определяются структурные схемы и геометрические параметры звеньев из отдельных простых структурных модулей. ПМ с двумя схватами может быть использован для перегрузочных операций между двумя соседними основными технологическими оборудованьями в технологической линии холодной штамповки.

Структурно-параметрический синтез ПМ с двумя схватами. На рис. 1 показана структурная схема ПМ с двумя схватами на двух положениях.

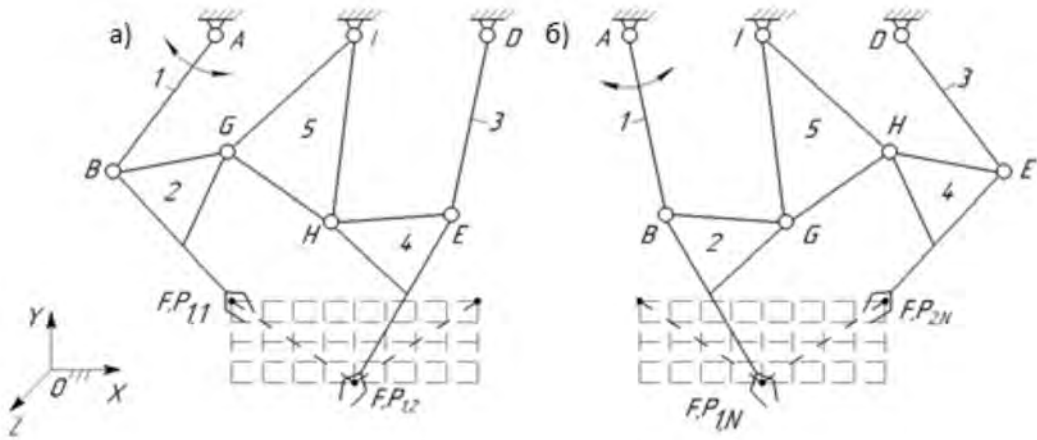


Рисунок 1 – ПМ с двумя схватами в двух положениях

В первом положении (Рис. 1а), первый захват P_1 в положении $P_{1,1}$ берет заготовку после обработки в первом гидравлическом прессе для доставки в магазин. В это время второй захват P_2 в положении $P_{2,1}$ берет предыдущую заготовку для доставки во второй гидравлический пресс. Во втором положении (Рис. 1б), первый захват P_1 в положении $P_{1,N}$ доставляет заготовку в магазин, а второй захват P_2 в положении $P_{2,N}$ доставляет предыдущую заготовку во второй гидравлический пресс, для дальнейшей обработки. Затем цикл повторяется.

Параметрами синтеза двух пассивных ЗКЦ ABC и DEF являются X_A, Z_A, l_{AB}, l_{BC} и X_D, Z_D, l_{DE}, l_{EF} соответственно, где X_A, Z_A и X_D, Z_D - координаты неподвижных шарниров A и D в абсолютной системе координат $OXYZ$; $l_{AB}, l_{BC}, l_{DE}, l_{EF}$ - длины звеньев AB, BC, DE, EF (Рис. 2). Обозначим эти параметры синтеза через векторы \mathbf{p}_1 и \mathbf{p}_2 где $\mathbf{p}_1 = [X_A, Z_A, l_{AB}, l_{BC}]^T$ и $\mathbf{p}_2 = [X_D, Z_D, l_{DE}, l_{EF}]^T$.

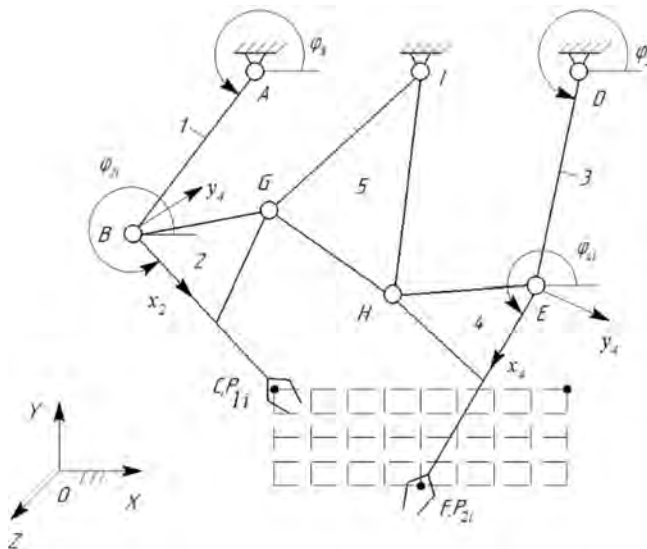


Рисунок 2 – ПМ с двумя схватами в первом положении

Поскольку пассивные ЗКЦ не накладывают геометрические связи на движения выходных объектов, то векторы \mathbf{p}_1 и \mathbf{p}_2 являются свободными и они варьируются для удовлетворения геометрических

связей, накладываемых ЗКЦ GHI . При этом должно удовлетворение следующих условий

$$|l_{AB} - l_{BC}| \leq \rho_{1\min}, \quad l_{AB} + l_{BC} \geq \rho_{1\max}, \quad (1)$$

$$|l_{DE} - l_{EF}| \leq \rho_{2\min}, \quad l_{DE} + l_{EF} \geq \rho_{2\max}, \quad (2)$$

где

$$\rho_{1\min} = \min_{X_{P_1}, Y_{P_1}} |l_{AP_{1i}}|, \quad \rho_{1\max} = \max_{X_{P_1}, Y_{P_1}} |l_{AP_{1i}}|, \quad (3)$$

$$\rho_{2\min} = \min_{X_{P_2}, Y_{P_2}} |l_{DP_{2i}}|, \quad \rho_{2\max} = \max_{X_{P_2}, Y_{P_2}} |l_{DP_{2i}}|. \quad (4)$$

Переменные расстояния $l_{AP_{1i}}$ и $l_{DP_{2i}}$ в выражениях (1) – (4) определяются уравнениями

$$l_{AP_{1i}} = \left[(X_{P_{1i}} - X_A)^2 + (Y_{P_{1i}} - Y_A)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (i=1, 2, \dots, N), \quad (5)$$

$$l_{DP_{2i}} = \left[(X_{P_{2i}} - X_D)^2 + (Y_{P_{2i}} - Y_D)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Рассмотрим параметрический синтез негативной ЗКЦ GHI с тремя отрицательными степенями свободы, определяемые по формуле Чебышева.

$$W = 3n - 2p_s = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 3 = -3. \quad (7)$$

Для этого предварительно определим положения звеньев 2 и 4 пассивных ЗКЦ ABC и DEF уравнениями

$$\varphi_{2i} = \text{tg}^{-1} \frac{Z_{P_{1i}} - Z_{B_i}}{X_{P_{1i}} - X_{B_i}}, \quad (8)$$

$$\varphi_{4i} = \text{tg}^{-1} \frac{Z_{P_{2i}} - Z_{E_i}}{X_{P_{2i}} - X_{E_i}}, \quad (9)$$

где

$$\begin{bmatrix} X_{B_i} \\ Z_{B_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Z_A \end{bmatrix} + l_{AB} \begin{bmatrix} \cos \varphi_{1i} \\ \sin \varphi_{1i} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} X_{E_i} \\ Z_{E_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_D \\ Z_D \end{bmatrix} + l_{DE} \begin{bmatrix} \cos \varphi_{3i} \\ \sin \varphi_{3i} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\varphi_{1_i} = \varphi_{AP_{1i}} - \cos^{-1} \frac{l_{AB}^2 + l_{AP_{1i}}^2 - l_{BC}^2}{2l_{AB}l_{AP_{1i}}}, \quad (12)$$

$$\varphi_{3_i} = \varphi_{DP_{2i}} + \cos^{-1} \frac{l_{DE}^2 + l_{DP_{2i}}^2 - l_{EF}^2}{2l_{DE}l_{DP_{2i}}}, \quad (13)$$

$$\varphi_{AP_{1i}} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{Z_{P_{1i}} - Z_A}{X_{P_{1i}} - X_A}, \quad (14)$$

$$\varphi_{DP_{2i}} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{Z_{P_{2i}} - Z_D}{X_{P_{2i}} - X_D}. \quad (15)$$

С звеньями BC и EF пассивных ЗКЦ ABC и DEF жестко соединяем системы координат Bx_2z_2 и Ex_4z_4 , где оси Bx_2 и Ex_4 направлены вдоль звеньев BC и EF , соответственно (Рис 3). Тогда параметрами синтеза негативной ЗКЦ GHI являются $x_G^{(2)}, z_G^{(2)}, x_H^{(4)}, z_H^{(4)}, l_{GH}, X_I, Z_I, l_{GI}, l_{HI}$, где $x_G^{(2)}, z_G^{(2)}, x_H^{(4)}, z_H^{(4)}, X_I, Z_I$ - координаты шарниров G, H, I в системах координат $Bx_2z_2, Dx_4z_4, OXYZ$, соответственно; l_{GH}, l_{GI}, l_{HI} - длины сторон GH, GI, HI звена GHI . Обозначим эти параметры синтеза через вектор $\mathbf{p}_3 = [x_G^{(2)}, z_G^{(2)}, x_H^{(4)}, z_H^{(4)}, l_{GH}, X_I, Z_I, l_{GI}, l_{HI}]^T$.

Поскольку трехшарнирная ЗКЦ GHI накладывает три геометрических связей на движения звеньев двух пассивных ЗКЦ ABC и DEF , составляем три функции взвешенных разностей

$$\Delta q_{1i} = (x_{H_i}^{(2)} - x_G^{(2)})^2 + (z_{H_i}^{(2)} - z_G^{(2)})^2 - l_{HG}^2, \quad (16)$$

$$\Delta q_{2i} = (X_{G_i} - X_I)^2 + (Z_{G_i} - Z_I)^2 - l_{GI}^2, \quad (17)$$

$$\Delta q_{3i}^{(2)} = (X_{H_i} - X_I)^2 + (Z_{H_i} - Z_I)^2 - l_{HI}^2, \quad (18)$$

где $x_H^{(2)}$ и $z_H^{(2)}$ - координаты шарнира H в локальной системе координат Bx_2z_2 , Z_{G_i}, X_{G_i} и X_{H_i}, Z_{H_i} - координаты шарниров G и H в абсолютной системе координат $OXYZ$, которые определяются уравнениями

$$\begin{bmatrix} x_{H_i}^{(2)} \\ z_{H_i}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{2i} & \sin \varphi_{2i} \\ -\sin \varphi_{2i} & \cos \varphi_{2i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{H_i} - X_{B_i} \\ Z_{H_i} - Z_{B_i} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} X_{G_i} \\ Z_{G_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{B_i} \\ Z_{B_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \varphi_{2i} & -\sin \varphi_{2i} \\ \sin \varphi_{2i} & \cos \varphi_{2i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_G^{(2)} \\ z_G^{(2)} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} X_{H_i} \\ Z_{H_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{E_i} \\ Z_{E_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \varphi_{4i} & -\sin \varphi_{4i} \\ \sin \varphi_{4i} & \cos \varphi_{4i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_H^{(4)} \\ z_H^{(4)} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где

$$\begin{bmatrix} X_{B_i} \\ Z_{B_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A \\ Z_A \end{bmatrix} + l_{AB} \begin{bmatrix} \cos \varphi_{1i} \\ \sin \varphi_{1i} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} X_{E_i} \\ Z_{E_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_D \\ Z_D \end{bmatrix} + l_{DE} \begin{bmatrix} \cos \varphi_{3i} \\ \sin \varphi_{3i} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Геометрическими смыслами функций (16) - (18) являются отклонения координат шарниров H и G от окружностей с радиусами l_{HG} , l_{GI} , l_{HI} , в относительном движении плоскости $E x_4 z_4$ и в абсолютном движении звена 5.

После замены параметров синтеза в виде

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_G^{(2)} \\ y_G^{(2)} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_H^{(4)} \\ y_H^{(4)} \end{bmatrix},$$

$$p_3 = \frac{1}{2}(x_G^{(2)^2} + z_G^{(2)^2} + x_H^{(4)^2} + z_H^{(4)^2} - l_{GH}^2),$$

$$\begin{bmatrix} p_6 \\ p_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_I \\ Z_I \end{bmatrix}, \quad p_8 = \frac{1}{2}(x_G^{(2)^2} + z_G^{(2)^2} + X_I^2 + Z_I^2 - l_{GI}^2),$$

$$p_9 = \frac{1}{2}(x_H^{(4)^2} + z_H^{(4)^2} + X_I^2 + Z_I^2 - l_{HI}^2). \quad (24)$$

функции (16) - (18) выражаются линейно относительно векторов параметров синтеза $\mathbf{p}_3^{(1)} = [p_1, p_2, p_3]^T$, $\mathbf{p}_3^{(2)} = [p_4, p_5, p_3]^T$, $\mathbf{p}_3^{(3)} = [p_6, p_7, p_8]^T$, $\mathbf{p}_3^{(4)} = [p_1, p_2, p_8]^T$, $\mathbf{p}_3^{(5)} = [p_6, p_7, p_9]^T$, $\mathbf{p}_3^{(6)} = [p_4, p_5, p_9]^T$ в виде

$$\Delta q_{1i}^{(k)} = 2(\mathbf{g}_{1i}^{(k)T} \cdot \mathbf{p}_3^{(k)} - g_{0i}^{(k)}), \quad k = 1, 2, \quad (25)$$

$$\Delta q_{2i}^{(k)} = 2(\mathbf{g}_{2i}^{(k)T} \cdot \mathbf{p}_3^{(k)} - g_{0i}^{(k)}), \quad k = 3, 4, \quad (26)$$

$$\Delta q_{3i}^{(k)} = 2(\mathbf{g}_{3i}^{(k)T} \cdot \mathbf{p}_3^{(k)} - g_{0i}^{(k)}), \quad k = 5, 6, \quad (27)$$

где

$$\mathbf{g}_{li}^{(1)} = - \left[\begin{array}{cc|c} \Gamma^{-1}(\varphi_{2i}) & & 0 \\ & & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} X_{E_i} - X_{B_i} \\ Z_{E_i} - Z_{B_i} \\ 1 \end{bmatrix} - \left[\begin{array}{cc|c} \Gamma(\varphi_{4i} - \varphi_{2i}) & & 0 \\ & & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

$$\mathbf{g}_{ii}^{(2)} = \begin{bmatrix} \Gamma^{-1}(\varphi_{4i}) & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{Ei} - X_{Bi} \\ Z_{Ei} - Z_{Bi} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma^{-1}(\varphi_{4i} - \varphi_{2i}) & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$\mathbf{g}_{0i}^{(1)} = -\frac{1}{2}[(X_{Ei} - X_{Bi})^2 + (Z_{Ei} - Z_{Bi})^2] + [X_{Ei} - X_{Bi}, Z_{Ei} - Z_{Bi}] \cdot \Gamma(\varphi_{4i}) \cdot \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$\mathbf{g}_{0i}^{(2)} = -\frac{1}{2}[(X_{Ei} - X_{Bi})^2 + (Z_{Ei} - Z_{Bi})^2] - [X_{Ei} - X_{Bi}, Z_{Ei} - Z_{Bi}] \cdot \Gamma(\varphi_{2i}) \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}, \quad (31)$$

$$\mathbf{g}_{2i}^{(3)} = -\begin{bmatrix} X_{Bi} \\ Z_{Bi} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma(\varphi_{2i}) & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (32)$$

$$\mathbf{g}_{2i}^{(4)} = \begin{bmatrix} \Gamma^{-1}(\varphi_{2i}) & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{Bi} \\ Z_{Bi} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma(\varphi_{2i}) & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_6 \\ p_7 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (33)$$

$$\mathbf{g}_{0i}^{(3)} = -\frac{1}{2}[X_{Bi}^2 + Z_{Bi}^2] + [X_{Bi}, Z_{Bi}] \cdot \Gamma(\varphi_{2i}) \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}, \quad (34)$$

$$\mathbf{g}_{0i}^{(4)} = -\frac{1}{2}[X_{Bi}^2 + Z_{Bi}^2] - [X_{Bi}, Z_{Bi}] \cdot \begin{bmatrix} p_6 \\ p_7 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

$$\mathbf{g}_{3i}^{(5)} = -\begin{bmatrix} X_{Ei} \\ Z_{Ei} \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Gamma(\varphi_{4i}) & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (36)$$

$$\mathbf{g}_{3i}^{(6)} = \begin{bmatrix} \Gamma^{-1}(\varphi_{4i}) & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{Ei} \\ Z_{Ei} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma(\varphi_{4i}) & 0 \\ 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_6 \\ p_7 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (37)$$

$$\mathbf{g}_{0i}^{(5)} = -\frac{1}{2}[X_{Ei}^2 + Z_{Ei}^2] + [X_{Ei}, Z_{Ei}] \cdot \Gamma(\varphi_{4i}) \cdot \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \end{bmatrix}, \quad (38)$$

$$\mathbf{g}_{0i}^{(6)} = -\frac{1}{2}[X_{Ei}^2 + Z_{Ei}^2] - [X_{Ei}, Z_{Ei}] \cdot \begin{bmatrix} p_6 \\ p_7 \end{bmatrix}. \quad (39)$$

Далее параметры синтеза негативной ЗКЦ GHI определяются на основе аппроксимационных задач Чебышевского и квадратического приближений [12,15].

Заключение. Проведен структурно-параметрический синтез ПМ с двумя схватами, согласно которому по заданным законам движений (или положений) двух схватов, определены структурные схемы и геометрические параметры звеньев. Структурная схема данного ПМ сформирована соединением двух выходных объектов (схватов) со стойкой при помощи двух пассивных и одной негативной ЗКЦ. Пассивными ЗКЦ являются два двухподвижных серийных манипуляторов, а негативной ЗКЦ – трехшарнирное звено. Пассивные ЗКЦ не накладывают геометрические связи на движения выходных объектов, а негативная ЗКЦ накладывает три геометрических связей. Поэтому геометрические параметры звеньев негативной ЗКЦ определяются, а геометрические параметры звеньев пассивных ЗКЦ варьируются для удовлетворения наложенных геометрических связей негативной ЗКЦ. Геометрические параметры негативной ЗКЦ определены на основе аппроксимационных задач Чебышевского и квадратического приближений

Благодарность. Данное исследование финансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант №AP08857522).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Baigunchekov Zh. et al. Synthesis of Cartesian Manipulator of a Class RoboMech. Mechanisms and Machine Science. Springer, 2019, Vol. 66 pp. 69-76.
- 2 Paul B. Kinematics and Dynamics of Planar Machinery. Prentice-Hall, 1979.
- 3 R. S. Hartenberg and J. Denavit. Kinematic Synthesis of Linkages. New York: McGraw-Hill, 1964.
- 4 Rodhavan M., Roth B. Solving Polynomial Systems for the Kinematic Analysis and Synthesis of Mechanisms and Robot Manipulators. Journal of Mechanical Design, June, 1995, 117 (8), pp. 71-79.
- 5 Erdman A.G., Sandor G.N., Kota S. Mechanism Design: Analysis and Synthesis Lecture Notes. McGill University, Montreal (Quebec), Canada, 2001.
- 6 Uicker J.J., Pennack G.R., Shigley J.E. Theory of Machines and Mechanisms. Oxford University Press, New York, Fourth Edition, 2001.
- 7 Hernandez A., Petya V. Position Analysis of Planar Mechanisms with R-pairs Using Geometrical-Iterative Method. Mechanism and Machine Theory, 2004, Vol. 39, Issue 2, pp. 84-97.
- 8 Pennock G.R., Israr A. Kinematic Analysis and Synthesis of an Adjustable Six-Bar Linkage. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44, pp. 306-323.
- 9 McCarthy J.M., Soh G.M. Geometric Design of Linkages. Springer. Second Edition, 2010.
- 10 Angeles J., Bai Sh. Kinematic Synthesis, Lecture Notes. McGill University, Montreal (Quebec). Canada, 2016.
- 11 Duffy J. Analysis of Mechanisms and Robot Manipulator. Edward Arnold, 1980.
- 12 Tsai L.W. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1999.
- 13 Glazunov V. Design of Decoupled Parallel Manipulators by Means of the Theory of Screws. Mechanism and Machine Theory, 2010, No 45, pp. 209-230.
- 14 McCarthy J.M. Kinematics, Polynomials, and Computers-A Brief History. Journal of Mechanisms and Robotics. February, 2011, Vol.3/010201-1.
- 15 McCarthy J.M. 21st Kinematics Synthesis, Compliance, and Tensegrity. Journal of Mechanisms and Robotics. May, 2011, Vol. 3/020202-1.

REFERENCES

- 1 Baigunchekov Zh. et al. Synthesis of Cartesian Manipulator of a Class RoboMech. Mechanisms and Machine Science. Springer, 2019, Vol. 66 pp. 69-76.
- 2 Paul B. Kinematics and Dynamics of Planar Machinery. Prentice-Hall, 1979.
- 3 R. S. Hartenberg and J. Denavit. Kinematic Synthesis of Linkages. New York: McGraw-Hill, 1964.
- 4 Rodhavan M., Roth B. Solving Polynomial Systems for the Kinematic Analysis and Synthesis of Mechanisms and Robot Manipulators. Journal of Mechanical Design, June, 1995, 117 (8), pp. 71-79.
- 5 Erdman A.G., Sandor G.N., Kota S. Mechanism Design: Analysis and Synthesis Lecture Notes. McGill University, Montreal (Quebec), Canada, 2001.
- 6 Uicker J.J., Pennack G.R., Shigley J.E. Theory of Machines and Mechanisms. Oxford University Press, New York, Fourth Edition, 2001.
- 7 Hernandez A., Petya V. Position Analysis of Planar Mechanisms with R-pairs Using Geometrical-Iterative Method. Mechanism and Machine Theory, 2004, Vol. 39, Issue 2, pp. 84-97.
- 8 Pennock G.R., Israr A. Kinematic Analysis and Synthesis of an Adjustable Six-Bar Linkage. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44, pp. 306-323.
- 9 McCarthy J.M., Soh G.M. Geometric Design of Linkages. Springer. Second Edition, 2010.
- 10 Angeles J., Bai Sh. Kinematic Synthesis, Lecture Notes. McGill University, Montreal (Quebec). Canada, 2016.
- 11 Duffy J. Analysis of Mechanisms and Robot Manipulator. Edward Arnold, 1980.
- 12 Tsai L.W. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1999.
- 13 Glazunov V. Design of Decoupled Parallel Manipulators by Means of the Theory of Screws. Mechanism and Machine Theory, 2010, No 45, pp. 209-230.
- 14 McCarthy J.M. Kinematics, Polynomials, and Computers-A Brief History. Journal of Mechanisms and Robotics. February, 2011, Vol.3/010201-1.
- 15 McCarthy J.M. 21st Kinematics Synthesis, Compliance, and Tensegrity. Journal of Mechanisms and Robotics. May, 2011, Vol. 3/020202-1.