

С. А. ТОЛЕНОВ*, **Б. М. САГИТЖАНОВ**, **Е. Н. ЖОЛДАСОВ**, **А. М. ТОЛЕУШОВА**,
Н. К. ДОСМАГАМБЕТ, **З. А. РАХМАТУЛЛА**, **А. Т. ИСКАКОВА**

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
tolenov.serik@mail.ru, beriksagitghanov94@gmail.com, jera.kz@mail.ru,
aida71193@mail.ru, nurdauletdosmagambet@gmail.com,
rakhmatulla.zanggar@gmail.com, iskakova.1977@mail.ru

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МАНИПУЛЯТОРА С ДВУМЯ ПОЛЗУНАМИ

В данной работе изложены методы структурно-параметрического синтеза параллельного манипулятора (ПМ) с двумя ползунами, который может быть использован в технологической линии холодной штамповки для подачи заготовок и их штамповки. ПМ с двумя ползунами сформирован соединением двух ползунков (входного и выходного объектов) при помощи одной пассивной и одной негативной замыкающих кинематических цепей (ЗКЦ). Пассивная ЗКЦ не накладывает геометрическую связь на движения ползунков и геометрические параметры её звеньев варьируются.

Ключевые слова: *параллельный манипулятор структурно – параметрический синтез, Чебышевское и квадратическое приближения.*

Введение. Задачи проектирования манипуляционных роботов как с серийными, так и параллельными манипуляторами в основном сводятся к решению обратной задачи кинематики и разработке систем управления и технических средств согласно полученным законам движений приводов [1-4]. При решении обратной задачи кинематики возможны неравномерность и реверсимость движения приводов, что ухудшает динамику манипуляционных роботов [5,6].

С целью улучшения динамических характеристик и упрощения систем управления проектируемых манипуляторов целесообразно задавать законы движения приводов наряду с заданными законами движений рабочих органов (схватов). Возможность задания законов движений приводов монотонно и равномерно улучшает динамические параметры, а само задание законов движений приводов существенно упрощает систему управления (в некоторых случаях исключает систему управления), следовательно, также повышается надежность и снижается себестоимость проектируемого манипулятора. Такие ПМ, обладающие свойством манипуляционных роботов, как воспроизведение заданных законов движений рабочих органов, и свойством механизмов, как задание законов движений приводов, названы ПМ класса RoboMech [7-8].

Структура технологической линии холодной штамповки. На рис. 1 показана схема простой однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки [14], где ТО – основное технологическое оборудование, ПР – промышленный робот, М – магазин поштучной выдачи заготовок.

* E-mail корреспондирующего автора: tolenov.serik@mail.ru

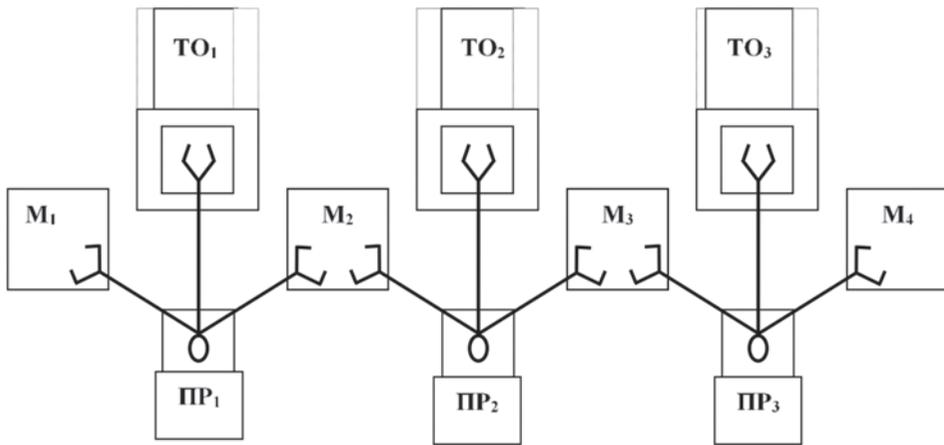


Рисунок 1 – Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки

Данная схема характерна для технологических процессов с малым циклом обработки предметов производства на технологическом оборудовании, что свойственно, в частности, процессам холодно-листовой штамповки. В этой схеме отсутствует межоперационная транспортная система, а изделия (предметы производства) передаются от одного технологического оборудования к другому непосредственно промышленными роботами.

Согласно разработанному принципу формирования ПМ класса RoboMech [19], объединяем основные технологические оборудования (гидравлические прессы) I и II с устройствами подачи заготовки III и отвода заготовок IV, а также объединяем два промышленных робота V и VI в один ПМ с двумя схватами.

Объединение гидравлических прессов I и II с устройствами подачи заготовки III и отвода заготовок IV в один ПМ I' и II' с двумя ползунами осуществляется соединением пуансонов Q' и Q'' гидроцилиндров I и II с ползунами P' и P'' устройств подачи заготовок III и отвода изделий IV при помощи пассивных замыкающих кинематических цепей (ЗКЦ) A'B'C' и A''B''C'', а также негативных ЗКЦ D'E' и D''E'', соответственно (Рисунок 2).

Объединение двух промышленных роботов (серийных манипуляторов) V и VI в один ПМ III' с двумя схватами осуществляется соединением звеньев B^{III}C^{III} и B^{IV}C^{IV} серийных манипуляторов A^{III}B^{III}C^{III} и A^{IV}B^{IV}C^{IV} при помощи негативной ЗКЦ D^{III}E^{III}F^{III}.

В результате получим структурную схему технологической линии с ПМ класса RoboMech с тремя степенями свободы, где две степени свободы имеет прессы I' и II', одну степень свободы имеет ПМ с двумя схватами III'. Гидравлические прессы I и I' с устройствами подачи и отвода заготовок II и II' работают в плоскости OXY, манипулятор с двумя схватами III' работает в плоскости OXZ.

На рисунке 2 также показана структурная схема IV' ПМ, работающего в цилиндрической системе координат. Данный ПМ используется для складирования готовых изделий в ячейки.

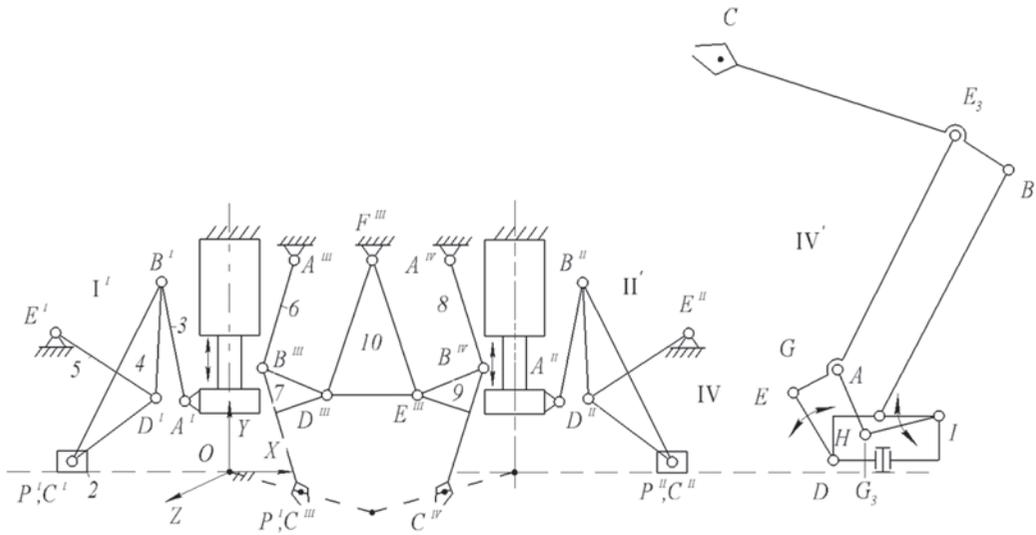


Рисунок 2 – Структурная схема технологической линии с ПМ класса RoboMech

Рассматриваемая технологическая линия с ПМ класса RoboMech работает следующим образом. При подаче заготовки для обработки прессом I' ползун P' занимает правое крайнее положения, а пуансон Q' гидроцилиндра занимает верхнее крайнее положение. При обработке заготовки пуансон Q' данного пресса занимает нижнее крайнее положение, а ползун P' возвращается в левое крайнее положение для доставки следующей заготовки. В момент возвращения пуансона Q' гидроцилиндра I' в верхнее положение первый захват C''' ПМ с двумя захватами занимает крайнее левое положение, захватывает обработанную заготовку и доставляет ее в магазин. В этот момент второй захват C'' доставляет предыдущую обработанную заготовку в пресс II' для последующей обработки, т.е. занимает крайнее верхнее положение. После вторичной обработки заготовки готовое изделие ползуном P'' доставляется в контейнер. Далее цикл повторяется.

После накопления изделий в контейнере он при помощи ПМ VI' складывается в ячейках. Особенностью данного ПМ является то, что его захват C^V воспроизводит серии горизонтальных и вертикальных траекторий. При этом серии горизонтальных траекторий воспроизводятся приводом (входным звеном) $D^V E^V$, а серии вертикальных траекторий – приводом $I^V H^V$. Вращение всего ПМ вокруг вертикальной оси обеспечивает пространственное движение схвата C^V в цилиндрической системе координат. Структурно-параметрический синтез данного ПМ рассмотрен в [8].

Рассмотрим структурно-параметрический синтез ПМ с двумя ползунами.

Структурно-параметрический синтез ПМ с двумя ползунами. Задачей структурно-параметрического синтеза ПМ с двумя ползунами является определение структурной схемы и геометрических параметров данного манипулятора, у которого, когда первый ползун Q (пуансон гидравлического пресса) занимает нижнее крайнее положение с ходом s_{Q_1} , то второй ползун P занимает левое крайнее положение с ходом s_{P_1} (Рисунок 3а), а также, когда первый ползун Q занимает верхнее крайнее

положение с ходом s_{P_N} , то второй ползун P занимает правое крайнее положение с ходом s_{Q_N} (Рисунок 3б). Для удобства отчета ходов ползунков абсолютная система координат OXY расположена в точке их пересечения.

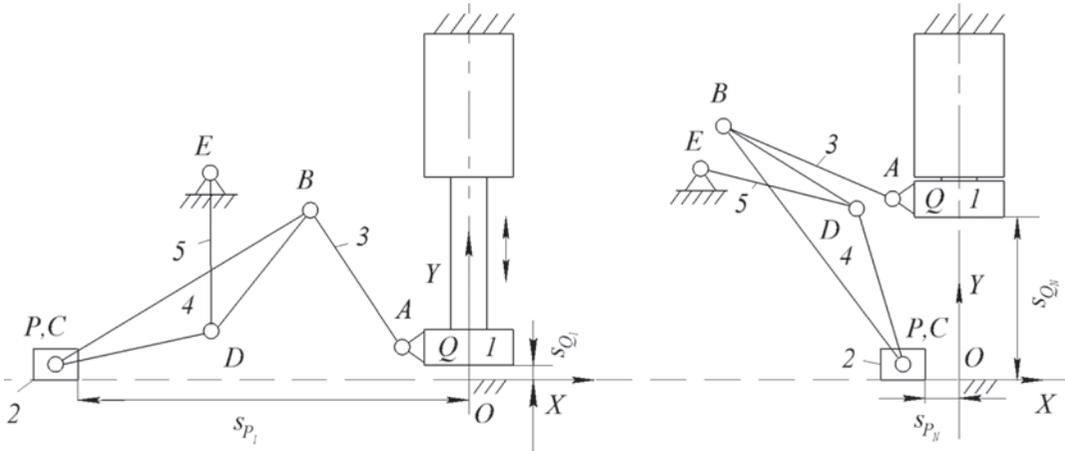


Рисунок 3 – Крайние положения ползунков P и Q

Как было отмечено выше, для формирования ПМ с двумя ползунами, обеспечивающего заданные их положения, соединяем пуансон Q гидравлического пресса и ползун P при помощи диады ABC с вращательными кинематическими парами. Диада ABC имеет нулевую степень свободы и является пассивной ЗКЦ, которая не накладывает геометрические связи на движения пуансона Q и ползуна P . Следовательно, пассивная ЗКЦ ABC позволяет воспроизведение заданных движений ползунков Q и P . Затем соединяем звено BC диады ABC со стойкой при помощи бинарного звена DE с вращательными кинематическими парами, которое имеет одну отрицательную степень свободы и является негативной ЗКЦ. Негативная ЗКЦ DE накладывает одну геометрическую связь на движения ползунков Q и P и в результате получим структурную схему ПМ со структурной формулой $I(0,1) \rightarrow III(3,4,2,5)$, где кинематическая цепь 3-4-2-5 представляет собой группу Ассур третьего класса [15].

Параметрами синтеза (геометрическими параметрами звеньев) пассивной ЗКЦ ABC является вектор $\mathbf{p}_1 = [x_A^{(1)}, y_A^{(1)}, x_C^{(2)}, y_C^{(2)}, l_{AB}, l_{BC}]^T$, где $x_A^{(1)}, y_A^{(1)}$ и $x_C^{(2)}, y_C^{(2)}$ – координаты шарниров A и C в подвижных системах координат Qx_1y_1 и Px_2y_2 , соответственно, l_{AB} и l_{BC} – длины звеньев AB и BC . Поскольку пассивная ЗКЦ ABC не накладывает геометрические связи на движения ползунков Q и P , то ее параметры синтеза задаются. Негативная ЗКЦ DE накладывает одну геометрическую связь на движения звеньев AB и BC пассивной ЗКЦ ABC , поэтому его параметры синтеза определяются. Задаваемые параметры синтеза пассивной ЗКЦ ABC варьируются при помощи LP_τ последовательности [16].

Рассмотрим параметрический синтез негативной ЗКЦ DE . Для этого необходимо предварительно определить угол φ_{ib} , определяющий положение звена BC , выражением

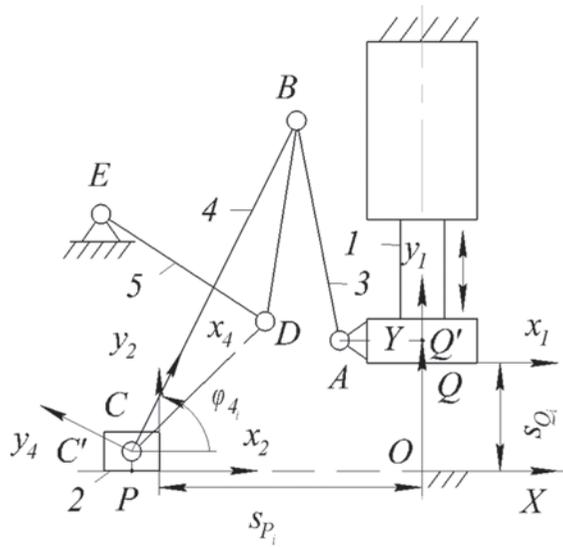


Рисунок 4 – Промежуточное положение ПМ с двумя ползунами

$$\varphi_{4_i} = \varphi_{(CA)_i} + \cos^{-1} \frac{l_{BC}^2 + l_{(CA)_i}^2 - l_{AB}^2}{l_{BC} l_{(CA)_i}}, \tag{1}$$

где

$$\varphi_{(CA)_i} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{Y_A - Y_{C_i}}{X_A - X_{C_i}}, \tag{2}$$

$$l_{(CA)_i} = [(X_A - X_{C_i})^2 + (Y_A - Y_C)^2]^{\frac{1}{2}}. \tag{3}$$

Координаты X_A, Y_A и X_{C_i}, Y_{C_i} шарниров A и C в абсолютной системе координат OXY в уравнениях (2) и (3) определяются выражениями

$$X_A = x_A^{(1)}, Y_A = s_{Q_i} + y_A^{(1)}, X_{C_i} = -s_{P_i} + x_C^{(2)}, Y_C = y_C^{(2)}. \tag{4}$$

С звеном CB диады ABC соединяем систему координат CE_4y_4 , ось CE_4 которой направлена вдоль звена CB . Тогда параметрами синтеза негативной ЗКЦ DE является вектор $\mathbf{p}_2 = [x_E^{(4)}, y_E^{(4)}, X_D, Y_D, l_{DE}]^T$, где $x_E^{(4)}, y_E^{(4)}$ и X_D, Y_D – координаты шарниров E и D в системах координат Cx_4y_4 и OXY соответственно.

Рассмотрим движение плоскости Cx_4y_4 в абсолютной системе координат OXY . При этом шарнир $E(x_E^{(4)}, y_E^{(4)})$ движется по дуге окружности с центром в шарнире $D(X_D, Y_D)$ и радиусом l_{DE} . Следовательно, уравнение геометрической связи, накладываемой негативной ЗКЦ DE вида BB на движение подвижной плоскости Cx_4y_4 , выражается в виде взвешенной разности

$$\Delta q_i = (X_{E_i} - X_D)^2 + (Y_{E_i} - Y_D)^2 - l_{DE}^2, \quad (5)$$

где X_{E_i} и Y_{E_i} – координаты шарнира E в абсолютной системе координат OXY , которые определяются выражением

$$\begin{bmatrix} X_{E_i} \\ Y_{E_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{C_i} \\ Y_{C_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \varphi_{4i} & -\sin \varphi_{4i} \\ \sin \varphi_{4i} & \cos \varphi_{4i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_E^{(2)} \\ y_E^{(2)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

После подстановки выражения (6) в уравнение (5) и при замене параметров синтеза вида

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_D \\ Y_D \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_E^{(4)} \\ y_E^{(4)} \end{bmatrix}, p_3 = \frac{1}{2} (X_D^2 + Y_D^2 + x_E^{(4)2} + y_E^{(4)2} - l_{ED}^2) \quad (7)$$

функция (5) выражается линейно по двум группам параметров синтеза $\mathbf{p}_2^{(1)} = [p_1, p_2, p_3]^T$ и $\mathbf{p}_2^{(2)} = [p_4, p_5, p_3]^T$ в виде

$$\Delta q_i^{(k)} (\mathbf{p}_2^{(k)}) = \mathbf{g}_i^{(k)T} \mathbf{p}_2^{(k)} - g_{oi}^{(k)}, k = 1, 2, \quad (8)$$

где $\mathbf{g}_i^{(k)}$ и $g_{oi}^{(k)}$ – коэффициенты векторов $\mathbf{p}_2^{(k)}$ и свободные члены, зависящие от оставшихся параметров синтеза, которые имеют вид

$$\mathbf{g}_i^{(1)} = - \begin{bmatrix} X_{C_i} \\ Y_{C_i} \\ 1 \end{bmatrix} - \left[\begin{array}{c|c} \Gamma(\varphi_{4i}) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{g}_i^{(2)} = - \begin{bmatrix} X_{C_i} \\ Y_{C_i} \\ 1 \end{bmatrix} - \left[\begin{array}{c|c} \Gamma(\varphi_{4i}) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} X_{C_i} \\ Y_{C_i} \\ 1 \end{bmatrix} + \left[\begin{array}{c|c} \Gamma(\varphi_{4i}) & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$g_{oi}^{(1)} = -\frac{1}{2} [X_{C_i}^2 + Y_{C_i}^2] + [X_{C_i}, Y_{C_i}] \cdot \Gamma(\varphi_{4i}) \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$g_{oi}^{(2)} = -\frac{1}{2} [X_{C_i}^2 + Y_{C_i}^2] - [X_{C_i}, Y_{C_i}] \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – матрица поворота вида

$$\Gamma(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Далее параметры синтеза рассматриваемого ПМ с двумя ползунами определяются на основе аппроксимационных задач Чебышевского и квадратического приближений, изложенных в [17].

Заключение. Разработана схема технологической линии холодной штамповки с применением ПМ класса RoboMech. В данной технологической линии использованы три ПМ класса RoboMech ПМ с двумя ползунами, ПМ с двумя схватами и ПМ, работающий в цилиндрической системе координат. ПМ с двумя ползунами сформирован соединением двух ползунов (входного и выходного объектов) при помощи одной пассивной и одной негативной ЗКЦ. Геометрические параметры звеньев негативной ЗКЦ определены на основе методов Чебышевского и квадратического приближений.

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

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Fu K.S., Gonzalez Z.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence. McGraw–Hill Book Company, 1987.
- 2 Yoshikava T. Foundation of Robotics: Analysis and Control. MIT Press, 1990.
- 3 Gupta K.C. Mechanics and Control of Robots. Springer–Verlag, NY, 1997.
- 4 Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control, John Wiley & Sons, Inc., Hobekon, N.J., 2006.
- 5 Song S.M., Lee J.K., Waldron K.J. Motion Study of Two – and Three–Dimensional Pantograph Mechanisms. Mechanism and Machine Theory, 1987, Vol. 22, No. 4, pp. 321–331.
- 6 Waldron K.J. and Kinzel G.L. The Relation Between Actuator Geometry and Mechanical Efficiency in Robots. Proc.4th CISM–IFTOMM Symposium on Theory and Practics of Manipulators, Poland, 1981, pp. 366–374.
- 7 Baigunchekov Zh. et al. Parallel Manipulator of a Class RoboMech. Lecture Notes in Electrical Engineering, 408, 2017, pp. 547–557.
- 8 Baigunchekov Zh., Mustafa A., Tarek S., Patel S., Utenov M. A Robomech Class Parallel Manipulator with Three Degrees of Freedom. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 3(1-105), pp.44-56.
- 9 Hunt K. H. Kinematic Geometry of Mechanisms. Clarendon Press, Oxford, 1998.
- 10 Kong X., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Springer, Heidelberg, 2007.
- 11 Sunkari R. P., Schmidt L. C. Structural Synthesis of Planar Kinematic Chains by Adapting McKay–Type Algorithm. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41, pp. 1021–1030.
- 12 Gogu G. Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 3: Topologies with Planar Motion of the Moving Platform Springer, Dordrecht, 2010.
- 13 Leila Notash, Jingqiu Zhang. Structural Synthesis of Kinematic Chains and Mechanisms. Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Springer Netherlands, 2002, pp. 391–398.
- 14 Grabchenko I.P., et al. Introduction to Mechatronics. Harkov, HPI, 2017.
- 15 Artobolevskiy. I.I. Theory of Mechanisms and Machines. Moscow, "Nauka", 1988.
- 16 Sobol I.M., Statnikov R.B. Choice of Optimal Parameters in Problems with Many Criteria. Moscow, 1981.
- 17 Baigunchekov Z., Naurushev B., Zhumasheva Z., Mustafa A., Kairov R., Amanov B. Structurally Parametric Synthesis and Position Analysis of a RoboMech Class Parallel Manipulator with Two End-Effectors. IAENG International Journal of Applied Mathematics, 2020, 5(1-77), pp. 1-11.

REFERENCES

- 1 Fu K.S., Gonzalez Z.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence. McGraw–Hill Book Company, 1987.
- 2 Yoshikava T. Foundation of Robotics: Analysis and Control. MIT Press, 1990.
- 3 Gupta K.C. Mechanics and Control of Robots. Springer–Verlag, NY, 1997.
- 4 Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control, John Wiley & Sons, Inc., Hobekon, N.J., 2006.
- 5 Song S.M., Lee J.K., Waldron K.J. Motion Study of Two – and Three–Dimensional Pantograph Mechanisms. Mechanism and Machine Theory, 1987, Vol. 22, No. 4, pp. 321–331.
- 6 Waldron K.J. and Kinzel G.L. The Relation Between Actuator Geometry and Mechanical Efficiency in Robots. Proc.4th CISM–IFToMM Symposium on Theory and Practics of Manipulators, Poland, 1981, pp. 366–374.
- 7 Baigunchekov Zh. et al. Parallel Manipulator of a Class RoboMech. Lecture Notes in Electrical Engineering, 408, 2017, pp. 547–557.
- 8 Baigunchekov Zh., Mustafa A., Tarek S., Patel S., Utenov M. A Robomech Class Parallel Manipulator with Three Degrees of Freedom. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 3(1-105), pp.44-56.
- 9 Hunt K. H. Kinematic Geometry of Mechanisms. Clarendon Press, Oxford, 1998.
- 10 Kong X., Gosselin C.M. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Springer, Heidelberg, 2007.
- 11 Sunkari R. P., Schmidt L. C. Structural Synthesis of Planar Kinematic Chains by Adapting McKay–Type Algorithm. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41, pp. 1021–1030.
- 12 Gogu G. Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 3: Topologies with Planar Motion of the Moving Platform Springer, Dordrecht, 2010.
- 13 Leila Notash, Jingqiu Zhang. Structural Synthesis of Kinematic Chains and Mechanisms. Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering, Springer Netherlands, 2002, pp. 391–398.
- 14 Grabchenko I.P., et al. Introduction to Mechatronics. Harkov, HPI, 2017.
- 15 Artobolevskiy. I.I. Theory of Mechanisms and Machines. Moscow, "Nauka", 1988.
- 16 Sobol I.M., Statnikov R.B. Choice of Optimal Parameters in Problems with Many Criteria. Moscow, 1981.
- 17 Baigunchekov Z., Naurushev B., Zhumasheva Z., Mustafa A., Kairov R., Amanov B. Structurally Parametric Synthesis and Position Analysis of a RoboMech Class Parallel Manipulator with Two End-Effectors. IAENG International Journal of Applied Mathematics, 2020, 5(1-77), pp. 1-11.

**С. Ә. ТӨЛЕНОВ, Б. М. САГИТЖАНОВ, Е. Н. ЖОЛДАСОВ, А. М. ТОЛЕУШОВА,
Н. Қ. ДОСМАҒАМБЕТ, З. А. РАХМАТУЛЛА, А. Т. ИСКАКОВА**

*Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Алматы қ., Қазақстан*

ЕКІ СЫРҒЫТПАСЫ БАР ПАРАЛЛЕЛЬДІ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ-ПАРАМЕТРЛІК СИНТЕЗ

Бұл жұмыста дайындамаларды беру және штамптау үшін суық штамптау өндірісінде қолдануға болатын екі сырғымалы параллельді манипулятордың (ПМ) құрылымдық-параметрлік синтезінің әдістері сипатталған. Екі сырғытпасы бар ПМ бір пассивті және бір теріс жабылатын

кинематикалық тізбектерді (CLC) пайдаланып, екі сырғытпаны (кіріс және шығыс объектілері) қосу арқылы қалыптасады. Пассивті ZKZ сырғытпалардың қозғалыстарына геометриялық байланыс орнатпайды және оның бұйындарының геометриялық параметрлері өзгереді.

Түйін сөздер: параллель манипулятордың құрылымдық-параметрлік синтезі, Чебышев және квадраттық жуықтаулар.

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

*Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan*

STRUCTURAL- PARAMETRIC SYNTHESIS OF A PARALLEL MANIPULATOR WITH TWO SLIDERS

In this paper, the methods of structural – parametric synthesis of a parallel manipulator PM with two sliders, which can be used in a cold-stamping processing technological line for feeding and stamping the workpieces, are described. A PM with two sliders is reinforced by connecting two sliders (input and output objects) using one passive and one negative closing kinematic chain circuits (CKC). The passive CKC does not impose a geometric constraint connection on the movement of the sliders and the geometric parameters of its links are varied vary.

Keywords: *parallel manipulator structural-parametric synthesis, Chebyshev and quadratic approximations.*