ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РЫЧАЖНОГО МЕХАНИЗМА СО СЛОЖНЫМИ КОНТУРАМИ

Оразалы Канлыбаев
доктор технических наук, профессор
Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева

Саткалиева Марфуга Оразалыевна
доктор технических наук, профессор
Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева

Ержан Заятович Галимов
старший преподаватель
Евразийского национального университета им. Л.Н.Гумилева

Түйіндеме

Айнымалы тұйық контурлары бар кеңістіктегі механизмнің синтездеу есебі қарастырылған. Механизмнің геометриялық параметрлерін анықтайтын теңдеу құрылған. Кіретін үзбелердің күйлері берілген синтез есебі шешілген.

Summary

The problem of synthesis of spatial linkage with adjustable closed contours. Compiled by the equation determining the geometric parameters of the mechanism. The problem of synthesis with the specified provisions of the input units.

Пространственные рычажные механизмы выполняют заданную функцию более точно благодаря тому, что при синтезе их вычисляется большое число параметров. Однако пространственные рычажные механизмы высоких классов имеют еще очень малое распространение вследствие того, что синтез этих механизмов представляет весьма значительные трудности.

В настоящей статье рассматривается задача проектирования пространственного рычажного механизма со сложными контурами.

Пространственный рычажный механизм VI класса с тремя степенями свободы общего вида изображен на рисунке.

Механизм содержит основание, кривошипы 1, 5, 9, связанные посредством шарниров с приводами вращательных движений, звенья 2, 4, 8, выполненные в виде треугольников, которые одними вершинами связаны посредством шарниров с кривошипами, а остальными вершинами соединены между собой посредством сферических и сферических с пальцем шарниров звеньями 3, 6, 7. Движение приводов вращательных движений, расположенных на основании через кривошипы 1, 5, 9 передается к шатуну, состоящему из трех треугольников 2, 4, 8 и рычагов 3, 6, 7, выполненных в виде шестисторонней изменяемой замкнутой системы, представляющей собой группу Ассура VI класса. В качестве входных звеньев приняты звенья 1, 5, 9, которые представлены в виде кривошипов. Обозначим через φ_1, φ_5, φ_9 углы, определяющие положения кривошипов 1, 5, 9 вращающихся вокруг неподвижных осей и примем их в качестве независимых переменных углов. Постоянными параметрами механизма являются: относительные длины звеньев l_1, l_{2AB}, l_{2AF}, l_{2BF}, l_3, l_{4CD}, l_{4DE}, l_{4CE} , l_5, l_6 , l_7 , l_{8KM} , l_{8NM} , l_{8KN} , l_9 , координирующие положение стойки звеньев 1, 5, 9: x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}, x_{03}, y_{03}, z_{03}, l_{0102}, l_{0103}, ξ_2, ξ_3 параметры, определяющие начало отсчета углов поворота звеньев 1, 5, 9, α , β , γ . Следует отнести к указанным параметрам углы μ_2, μ_4, μ_8 одной из вершин треугольных звеньев 2, 4, 8 в точках их присоединения с другими звеньями. Для определенности движения звеньев 2, 4, 8 заданы углы ε_2, ε_4, ε_8, образуемые соответствующими сторонами указанных звеньев и осями шарниров в точках *A, D, M.* Кроме того, для механизма общего вида должны быть заданы углы τ_2, τ_3, τ_4, τ_8, τ_9, v_{x2}, v_{x3}, v_{x4}, v_{x8}, v_{x9}, v_{y2}, v_{y3}, v_{y4}, v_{y8}, v_{y9} наклона шарниров соответствующих звеньев 2, 4, 8 и осей шарниров в точках O_2 , O_3 на оси прямоугольной системы координат. Таким образом, общее количество постоянных параметров механизма равно сорок.

Постановка задачи. Кинематическая схема пространственного механизма VI класса с тремя степенями свободы представляет собой сложный замкнутый векторный контур. Известно, что сложные замкнутые векторные контуры состоят из двух и более замкнутых многоугольников, причем некоторые стороны указанных многоугольников являются общими [1].

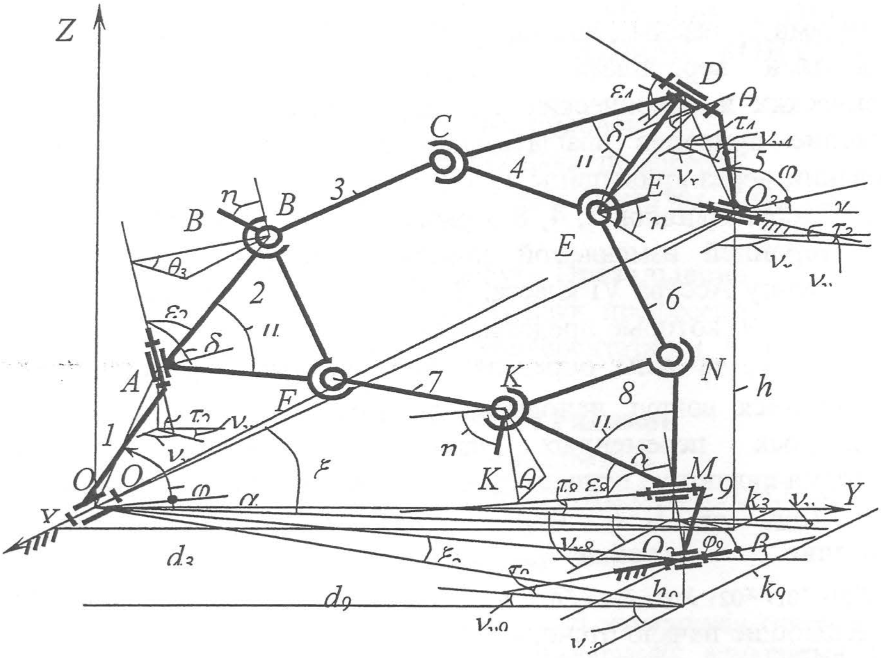

Рисунок 1 - Пространственный рычажный механизм VI класса с тремя степенями свободы

В данном случае сложный замкнутый векторный контур рассматриваемого механизма состоит из трех замкнутых многоугольников $O_1ABCDO_3O_1$, $O_1AFKMO_2O_1$, $O_2MNEДO_3O_2$, в которых общими сторонами являются O_1A, O_3D, O_2M, O_1O_2, O_1O_3 и O_2O_3. Этими общими сторонами и устанавливается связь между замкнутыми многоугольниками одного и того же сложного замкнутого векторного контура. Замкнутый векторный контур представляет собой изменяющийся замкнутый многоугольник, но при его изменениях линии действия его векторов постоянно должны пересекаться, так как в противном случае нарушается поставленное условие замкнутости рассматриваемого контура. Данное условие замкнутости может быть выражено для сложного векторного контура механизма в виде нескольких уравнений замкнутости. Уравнением замкнутости векторного контура является равенство нулю геометрической суммы его векторов, непрерывно следующих один за другим. Поэтому, в начальном этапе синтеза каждый замкнутый многоугольник сложного замкнутого векторного контура рассматривается по отдельности, а далее устанавливается их соответствие условию замкнутости указанного векторного контура.

Рассматриваемый механизм воспроизводит функцию трех независимых переменных $\psi_{мех} = F(\varphi_1, \varphi_5, \varphi_9)$, которая определяется сорока постоянными параметрами. Параметры механизма должны быть определены из условия приближения к нулю отклонения Δ, в заданных интервалах изменения независимых переменных углов φ_1, φ_5, φ_9. Зависимость Δ от искомых размеров представляется в виде сложного выражения, поэтому целесообразным является использование выражения взвешенной разности Δq для синтеза пространственных механизмов со многими степенями свободы [2].

Выражение взвешенной равности.

1. Рассмотрим замкнутый многоугольник $O_1ABCDO_3O_1$ (рисунок 1). Для получения выражения взвешенной разности в состав рассматриваемого многоугольника введено дополнительное звено в виде ползуна вместо сферической пары в точке *C*, перемещающегося по направлению *BC* [2]. В качестве взвешенной разности примем величину:

$$\Delta q = l_3^2 - l_{3\phi}^2, \qquad (1)$$

Обозначим через $l_{3\phi}$ расстояние между точками *B* и *C*, которое получается при заданных значениях независимых переменных углов φ_1, φ_5, φ_9. Зависимость величины $l_{3\phi}$ от искомых параметров кинематической схемы механизма определяется известными тридцати пятью параметрами, входящими в выражения координат точек *B* и *C*. Вычислению подлежат пять параметров d_3, k_3, h_3, l_3, l_{4CD} механизма. Тогда из условия замкнутости многоугольника $O_1ABCDO_3O_1$ после некоторых преобразований выражение взвешенной разности имеет вид:

$$\begin{aligned}\Delta q =\ & l_3^2 - l_1^2 + l_2^2 + l_4^2 + l_5^2 + x_3^2 + y_3^2 + h_3^2 - 2x_3 l_1 \cos\varphi_1 + 2x_3 l_5 \cos\varphi_3 + \\ & + 2x_3 l_4 \cos\psi_3 - 2y_3 l_2 + 2y_3 l_5 \sin\varphi_3 + 2y_3 l_4 \sin\psi_3 - 2h_3 l_1 \sin\varphi_1 + \\ & + 2l_4 l_5 \cos(\psi_3 - \varphi_3) - 2l_1 l_5 \cos\varphi_1 \cos\varphi_3 - 2l_1 l_4 \cos\varphi_1 \cos\psi_3 - \\ & - 2l_2 l_5 \sin\varphi_3 - 2l_2 l_4 \sin\psi_3. \qquad (2)\end{aligned}$$

где $x_3 = k_3$, $y_3 = d_3$, $l_4 = l_{4CD}$, $\varphi_3 = \varphi_5$, $\psi_3 = \psi_4$.

Вычисление пяти параметров. Для вычисления пяти параметров $d_3, k_3, h_3, l_3, l_{4CD}$ представим выражение (2) в виде:

$$\begin{aligned}\Delta q = & p_1 f_1(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) + p_2 f_2(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) + p_3 f_3(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) + \\ & + p_4 f_4(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) + p_5 f_5(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) + p_6 f_6(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) + \\ & + p_7 f_7(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) - F(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9),\end{aligned} \tag{3}$$

где

$$p_1 = x_3,\ p_2 = y_3,\ p_3 = h_3,\ p_4 = l_4,\ p_5 = x_3^2 + y_3^2 + h_3^2 + l_4^2 - l_3^2,$$

$$p_6 = p_1 p_4 = x_3 l_4,\ p_7 = p_2 p_4 = y_3 l_4. \tag{4}$$

$$\begin{aligned}& f_1(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -2l_1\cos\varphi_1 + 2l_5\cos\varphi_3, \\ & f_2(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -2l_1 + 2l_5\sin\varphi_3, \\ & f_3(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -2l_1\sin\varphi_1, \\ & f_4(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = 2l_5\cos(\psi_3 - \varphi_3) - 2l_1\cos\varphi_1\cos\psi_3 - 2l_1\sin\psi_3, \\ & f_5(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = 1, \\ & f_6(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = 2\cos\psi_3, \\ & f_7(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = 2\sin\psi_3, \\ & F(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -l_1^2 - l_2^2 - l_5^2 + 2l_1 l_5\cos\varphi_1\cos\varphi_3 + 2l_2 l_5\sin\varphi_3.\end{aligned} \tag{5}$$

При решении задачи по методу интерполирования выбираем пять точек в заданной области изменения углов $\varphi_1,\ \varphi_5, \varphi_9$, для которых отклонения взвешенной разности Δq должны равняться нулю. Обозначим значение углов $\varphi_1,\ \varphi_5, \varphi_9$ в этих точках через $\varphi_{1i},\ \varphi_{5i},\ \varphi_{9i}$, где $i = \overline{1{,}5}$.

Тогда

$$\begin{aligned}& p_1 f_1(\varphi_{1i},\varphi_{5i},\varphi_{9i}) + p_2 f_2(\varphi_{1i},\varphi_{5i},\varphi_{9i}) + p_3 f_3(\varphi_{1i},\varphi_{5i},\varphi_{9i}) + \\ & + p_4 f_4(\varphi_{1i},\varphi_{5i},\varphi_{9i}) + p_5 f_5(\varphi_{1i},\varphi_{5i},\varphi_{9i}) + p_6 f_6(\varphi_{1i},\varphi_{5i},\varphi_{9i}) + \\ & + p_7 f_7(\varphi_{1i},\varphi_{5i},\varphi_{9i}) - F(\varphi_{1i},\varphi_{5i},\varphi_{9i}) = 0, \quad i = \overline{1{,}5}.\end{aligned} \tag{6}$$

Решая систему уравнений, находим коэффициенты $p_1, p_2, p_3, p_4\ p_5$ и вычисляем искомые параметры механизма из соотношений (4). Тогда $d_3 = p_2;\ k_3 = p_1;\ h_3 = p_3;\ l_{4CD} = p_4$. $l_3 = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 - p_5}$.

Далее, по аналогичной схеме [2] можно вычислить другие комбинации пяти параметров $d_3,\ h_3,\ \xi_3,\ l_3,\ l_{2AB}$. Затем вычисляются $\xi_{03},\ \beta\ h_3,\ l_3,\ l_5$ и т.д.

1. Рассмотрим замкнутый многоугольник $O_1AFKMO_2O_1$ сложного векторного контура механизма. Аналогично предыдущему пункту 1, введено в состав многоугольника дополнительное звено в виде ползуна, вместо сферической с пальцем пары в точке K, перемещающегося по направляющей FK. Величина взвешенной разности имеет вид:

$$\Delta q = l_7^2 - l_{7\phi}^2, \tag{7}$$

где $l_{7\phi}$ обозначает расстояние между точками K и F звена 7 при заданных значениях-независимых переменных углов φ_1, φ_5, φ_9. В дальнейшем будем считать известными тридцать пять параметров схемы механизма, входящий в выражение координат точек F и K. Вычислению подлежат пять параметров d_9, k_9, h_9, l_7, l_{2AF}. Зависимость $l_{7\phi}$ от искомых параметров определяется соотношениями точек K и F звена 7 по кинематической схеме механизма. После подстановки полученных соотношений $l_{7\phi}$ в уравнение (7) выражение взвешенной разности имеет вид:

$$\begin{aligned}\Delta q = {} & l_7^2 - l_1^2 + l_6^2 + l_8^2 + l_9^2 + x_2^2 + y_2^2 + h_2^2 - 2l_1x_2\cos\varphi_1 - 2l_6x_2\cos\alpha\cos\psi_1 - \\ & - 2x_2l_8 - 2l_6y_3\sin\alpha + 2l_9y_2\cos\varphi_2 - 2l_1h_2\sin\varphi_1 - 2l_6h_3\cos\alpha\sin\psi_1 + \\ & + 2l_9h_3\sin\varphi_2 + 2l_1l_6\cos\alpha\cos(\psi_1 - \varphi_1) + 2l_1l_8\cos\varphi_1 - 2l_1l_9\sin\varphi_1\sin\varphi_2 + \\ & + 2l_6l_8\cos\alpha\cos\psi_1 - 2l_6l_9\sin\alpha\cos\varphi_2 - 2l_6l_9\cos\alpha\sin\psi_1\sin\varphi_2\end{aligned} \tag{8}$$

где $l_6 = l_{2AF}$, $x_2 = k_9$, $y_2 = d_9$, $h_2 = h_9$, $\varphi_2 = \varphi_9$, $\psi_1 = \psi_2$.

Вычисление пяти параметров. Искомые параметры многоугольника $O_1AFKMO_2O_1$ определяются выражением взвешенной разности (8) и использованием уравнений в виде (3).

С учетом уравнений (3) для замкнутого контура $O_1AFKMO_2O_1$ имеем

$$\begin{aligned}& p_1 = (x_2 - l_8),\ p_2 = y_2,\ p_3 = h_2,\ p_4 = l_6, \\ & p_5 = (x_2 - l_8)^2 + y_2^2 + h_2^2 + l_6^2 - l_7^2, \\ & p_6 = p_1p_4,\ p_7 = p_2p_4,\ p_8 = p_3,p_4.\end{aligned} \tag{9}$$

$$
\begin{aligned}
&f_1(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -2l_1\cos\varphi_1,\\
&f_2(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = 2l_9\cos\varphi_2, \qquad (10)\\
&f_3(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -2l_1\sin\varphi_1 + 2l_9\sin\varphi_2,\\
&f_4(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = 2l_1\cos\alpha\cos(\psi_1-\varphi_1) - 2l_9\sin\alpha\cos\varphi_2 -\\
&-2l_9\cos\alpha\sin\psi_1\sin\varphi_2,\\
&f_5(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = 1,\\
&f_6(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -2\cos\alpha\cos\psi_1,\\
&f_7(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -2\sin\alpha,\\
&f_8(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -2\cos\alpha\sin\psi_1,\\
&F(\varphi_1,\varphi_5,\varphi_9) = -l_1^2 - l_9^2 + 2l_1l_9\sin\varphi_1\sin\varphi_2.
\end{aligned}
$$

Используем для решения задачи синтеза параметров механизма известную схему решения линейных уравнений (6) для определения коэффициентов. Находим искомые параметры механизма из соотношений (9).

Тогда $d_9 = p_2$; $k_9 = p_1$; $h_9 = p_3$; $l_{2AF} = p_4$;

$$l_7 = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 - p_5}.$$

Аналогичным образом можно вычислить другие комбинации параметров данного замкнутого многоугольника.

3. Рассмотрим замкнутый многоугольник $O_2MNEDO_3O_2$. Аналогично предыдущему пункту 1, введено в состав многоугольника дополнительное звено в виде ползуна, вместо сферической с пальцем пары в точке *E*, перемещающегося по направляющей *NE*. Величина взвешенной разности имеет вид:

$$\Delta q = l_6^2 - l_{6\phi}^2, \qquad (11)$$

где $l_{6\phi}$ обозначает расстояние между точками *E* и *N* звена 6 при заданных значениях независимых переменных углов φ_1, φ_5, φ_9. В дальнейшем будем считать известными тридцать пять параметров схемы механизма, входящий в выражение координат точек *N* и *E*. Вычислению подлежат пять параметров. Зависимость $l_{6\phi}$ от искомых параметров определяется соотношениями точек *E* и *N* звена 6 по кинематической схеме механизма. После подстановки полученных соотношений $l_{6\phi}$ в уравнение (11) выражение взвешенной разности имеет вид:

$$
\begin{aligned}
\Delta q = {} & l_6^2 - l_5^2 + l_9^2 + l_{10}^2 + l_{12}^2 + (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (h_2 - h_3)^2 - \\
& - 2l_5(x_2 - x_3)\cos\varphi_3 + 2l_{10}(x_2 - x_3)\cos\gamma - 2l_{12}(x_2 - x_3)\cos\psi_3' - \\
& - 2l_5(y_2 - y_3)\sin\varphi_3 + 2l_9(y_2 - y_3)\cos\varphi_2 + 2l_{10}(y_2 - y_3)\sin\gamma\cos\psi_2 - \\
& - 2l_{12}(y_2 - y_3)\sin\psi_3' + 2l_9(h_2 - h_3)\sin\varphi_2 + 2l_{10}(h_2 - h_3)\sin\gamma\sin\psi_2 - \\
& - 2l_5 l_9\cos\varphi_2\sin\varphi_3 - 2l_5 l_{10}\cos\gamma\cos\varphi_3 - 2l_5 l_{10}\sin\gamma\cos\psi_2\sin\varphi_3 + \\
& + 2l_5 l_{12}\cos(\psi_3' - \varphi_3) + 2l_9 l_{10}\sin\gamma\cos(\psi_2 - \varphi_2) - 2l_9 l_{12}\cos\varphi_2\sin\psi_3' - \\
& - 2l_{10} l_{12}\cos\gamma\cos\psi_3' - 2l_{10} l_{12}\sin\gamma\cos\psi_2\sin\psi_3'.
\end{aligned}
\qquad (12)
$$

где $l_{8MN} = l_{10}$, $l_{4ED} = l_{12}$, $l_6 = l_{11}$, $\varphi_2 = \varphi_9$, $\varphi_3 = \varphi_5$, $\psi_3 = \psi_4$.

Вычисление пяти параметров l_{8MN}, l_{4ED}, l_6, k_{0203}, h_{0203}. Искомые параметры данного многоугольника определяются выражением взвешенной разности (12) и использованием уравнения (3). Тогда

$$
\begin{aligned}
& p_1 = l_{10}, \quad p_2 = l_{12}, \quad p_3 = (x_2 - x_3), \\
& p_4 = (h_2 - h_3), \quad p_5 = l_{10}^2 + l_{12}^2 - l_{11}^2, \quad p_6 = p_1 p_2, \\
& p_7 = p_2 p_4.
\end{aligned}
\qquad (13)
$$

$$
\begin{aligned}
& f_1(\varphi_1, \varphi_5, \varphi_9) = 2(x_2 - x_3)\cos\gamma + 2(y_2 - y_3)\sin\gamma\cos\psi_2 + \\
& +2(h_2 - h_3)\sin\gamma\sin\psi_2 - 2l_5\cos\gamma\cos\varphi_3 - \\
& -2l_5\sin\gamma\cos\psi_2\sin\varphi_3 + 2l_9\sin\gamma\cos(\psi_2 - \varphi_2), \\
& f_2(\varphi_1, \varphi_5, \varphi_9) = -2(x_2 - x_3)\cos\psi_3' - 2(y_2 - y_3)\sin\psi_3' + \\
& + 2l_5\cos(\psi_3' - \varphi_3) - 2l_9\cos\varphi_2\sin\psi_3', \\
& f_3(\varphi_1, \varphi_5, \varphi_9) = 1, \\
& f_4(\varphi_1, \varphi_5, \varphi_9) = -2\cos\gamma\cos\psi_3' - 2\sin\gamma\cos\psi_2\sin\psi_3', \\
& f_5(\varphi_1, \varphi_5, \varphi_9) = 1, \\
& f_6(\varphi_1, \varphi_5, \varphi_9) = 1, \\
& f_5(\varphi_1, \varphi_5, \varphi_9) = 1.
\end{aligned}
\qquad (14)
$$

$$
\begin{aligned}
F = {} & -l_5^2 - l_9^2 + 2l_5(x_2 - x_3)\cos\varphi_3 + 2l_5(y_2 - y_3)\sin\varphi_3 + \\
& + 2l_5 l_9\sin\varphi_3\cos\varphi_2 - 2l_9(h_2 - h_3)\sin\varphi_2 - 2l_9(y_2 - y_3)\cos\varphi_2.
\end{aligned}
$$

Используем для решения задачи синтеза параметров механизма известную схему решения линейных уравнений (6) для определения коэффициентов. Находим искомые параметры механизма из соотношений (13).

Тогда $l_{8MN} = p_1$; $l_{4ED} = p_2$; $k_{0203} = p_3$; $h_{0203} = p_4$;

$$l_6 = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 - p_5} \,.$$

Аналогичным образом можно вычислить другие комбинации параметров данного замкнутого многоугольника.

4. **Условие замкнутости сложного замкнутого векторного контура.** Замкнутый векторный контур, как указывалось выше, представляет собой изменяющийся многоугольник, стороны которого в общем случае могут менять свои величины и свое относительное расположение. В данном механизме изменяющийся замкнутый многоугольник представляет собой пространственную группу Ассура VI класса, которая крайними шарнирами звеньев 2, 4, 8 в точках *A, D, M* соединена с тремя входными звеньями 1, 5, 9. Расстояние между указанными точками *A* и *D, D* и *M, M* и *A* является переменной величиной и должно удовлетворять условию проворачиваемости механизма с тремя входными звеньями. При решении задачи синтеза в рассмотренных замкнутых многоугольниках $O_1ABCDO_3O_1$, $O_1AFKMO_2O_1$, $O_2MNEDO_3O_2$ были найдены координаты точек *A, D, M* для трех многоугольников для заданных пяти значений в области изменения независимых переменных углов φ_1, φ_5, φ_9 входных звеньев 1, 5, 9. По найденным значениям координат точек *A, D, M* шарниров была определена переменная величина расстояния между указанными точками. Кроме того, вычисленные параметры каждого замкнутого многоугольника $O_1ABCDO_3O_1$, $O_1AFKMO_2O_1$, $O_2MNEDO_3O_2$ должны удовлетворять условию замкнутости пространственной группы Ассура VI класса, а расстояние между крайними шарнирами звеньев 2, 4, 8 в точках *A, D, M* соответствовать требуемым условиям отклонения взвешенной разности механизма.

Пример. Требуется синтезировать трехкривошипный пространственный рычажный механизм VI класса. Решение проведем при вычислении пяти параметров сложного замкнутого векторного контура механизма при единичной длине кривошипов.

Рассмотрим решения задачи синтеза по пяти параметрам замкнутого многоугольника $O_1ABCDO_3O_1$. Результаты вычисления замкнутого многоугольника $O_1ABCDO_3O_1$ сложного векторного контура механизма показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты вычисления значений независимых функций переменных аргументов

φ_1	φ_5	φ_9	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	F
0.00	0.00	4.7495	0	-14.00	0	13.99	1	0.0074	-0.1998	-490.0
0.2617	0.2617	4.7590	0	-11.887	-2.386	10.88	1	0.0329	-0.3781	-431.79
0.5235	0.5235	4.7643	0	-18.648	-7.223	8.318	1	0.0040	-0.08561	-407.50
0.7853	0.7853	4.7662	0	-10.213	-3.565	6.712	1	0.0077	-0.5671	-395.63
1.0471	1.0471	4.7661	0	-9.7566	-8.075	5.739	1	0.0053	-0.04321	-257.09

После подстановки данных значения функции система уравнений (6) примет вид:

$$-14.00p_2+13.99p_4+p_5+0.0074p_6-0.1998p_7=490$$
$$-11.357p_2-2.386p_3+10.88p_4+p_5+0.0329p_6-0.3781p_7=431.79$$
$$-18.648p_2-7.223p_3+8.318p_4+p_5+0.0040p_6-0.08561p_7=407.50$$
$$-10.213p_2-3.565p_3+6.712p_4+p_5+0.0077p_6-0.5671p_7=395.633$$
$$-9.7577p_2-8.075p_3\_5.739p_4+p_5+0.0053p_6-0.0432p_7=257.091$$

Решая эту систему, находим коэффициенты $p_1, p_2, p_3, p_4\ p_5$: Вычисляем искомые параметры $d_3, k_3, h_3, l_3, l_{4CD}$ из соотношения (4).

Аналогичным образом определяются искомые параметры для замкнутых многоугольников $O_1AFKMO_2O_1$, $O_2MNEDO_3O_2$.

Условие замкнутости пространственной группы Ассура VI класса.

Для заданных значений независимых переменных углов φ_1, φ_5, φ_9 входных звеньев 1, 5, 9, в ходе решения найдены координаты крайних шарниров в точках A , D, M, которые позволили определить расстояния между указанными точками.

$x_{AD} = 0.460$ *м*;	$y_{AD} = 0.1669$ *м*;	$z_{AD} = 0.425$ *м*;
$x_{DM} = 0.119$ *м*;	$y_{DM} = 0.590$ *м*;	$z_{DM} = 0.420$ *м*;
$x_{MA} = 0.820045$ *м*;	$y_{MA} = 0.9259$ *м*;	$z_{MA} = 0.59715$ *м*.

Список использованной литературы:

1. Зиновьев В.А. Пространственные механизмы с низшими парами. Гостехтеоретиздат. - М.: 1952. – 431 с.
2. Левитский Н.И. Приближенный синтез шарнирных механизмов с двумя степенями свободы //Тр. семинара по ТММ. - вып.83.-изд-во АН СССР.-1961.