

## СИНТЕЗ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Фомин А.С.<sup>1</sup>, Парамонов М.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, Россия (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42), e-mail: alexey-nvkz@mail.ru

При обработке сложных внутренних поверхностей деталей машин переменного сечения обрабатываемому элементу должно быть задано движение по пространственной траектории. Пространственные механизмы второго семейства, имеющие в полном декартовом пространстве четыре относительных движения и гарантированно воспроизводящие винтовое движение, являются наиболее пригодными для реализации этой цели. В настоящей работе впервые синтезированы кинематические схемы пространственных механизмов для обработки сложных внутренних поверхностей, защищенные патентами Российской Федерации. Разработанные механизмы были исследованы кинематически путем определения траектории движения их выходных звеньев с режущими элементами. Результаты проведенного исследования позволяют проанализировать движение режущего элемента, оптимизировать конструкции механизмов и подобрать под заданные поверхности детали машин параметры механизмов, обеспечивающие требуемое движение режущего инструмента.

Ключевые слова: обработка внутренних поверхностей, механизмы второго семейства, общие наложенные связи, степень свободы, кинематика, трехмерное моделирование.

## THE SYNTHESIS AND KINEMATIC ANALYSIS OF MECHANISMS FOR CUTTING OF COMPLEX INTERNAL SURFACES OF MACHINE ELEMENTS

Fomin A.S.<sup>1</sup>, Paramonov M.E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia (654007, Novokuznetsk, street Kirova, 42), e-mail: alexey-nvkz@mail.ru

The motion along a spatial path should be set for machining tools to cut complex internal surfaces with variable cross sections of the machine elements. Spatial mechanisms of the second family, which have four relative motions within absolute Cartesian space of coordinate and necessarily produce a screw motion, are the most suitable means of realizing this aim. Kinematic schemes of the spatial mechanisms for cutting internal surfaces have been described for the first time in this paper. These mechanisms are protected by patents of the Russian Federation. Developed mechanisms have been kinematically investigated by the identification of motion paths of their output links with machining tools. The results of these investigations allow analysis of the tools' motion, optimization in their construction and the use of relevant parameters, and designing their motions to obtain specified surfaces of machine elements.

Keywords: internal surface machining, mechanisms of the second family, general imposed constraints, degree of freedom, kinematics, three-dimensional simulation.

### Введение

Экономическое развитие государства напрямую связано с развитием и совершенствованием машиностроительной отрасли производства. Создание новых машин и механизмов возможно только на основе серьезного научного фундамента, позволяющего обеспечить высокую эффективность машин самого различного назначения уже на стадии их проектирования.

Настоящее исследование проводится с целью создания (синтеза) механизмов для обработки сложных внутренних поверхностей деталей машин переменного сечения, а также их дальнейшего кинематического анализа. В таких механизмах обрабатываемому элементу – резцу должно быть задано движение по сложной винтовой траектории, осью которой не

является прямая линия, в связи с чем применение обычных винтовых механизмов не позволяет решить такую задачу.

Для достижения поставленной цели в наибольшей степени пригодными являются механизмы второго семейства [1], звенья которых в полном декартовом пространстве имеют четыре относительных движения, либо односемейственные (комбинированные) механизмы [2], включающие в свой состав не только механизмы второго семейства, но и механизмы иных семейств.

**Методы исследования**, применяемые в настоящей работе, основаны на принципах теории структурного синтеза механизмов при использовании универсальной структурной системы; на методах аналитического исследования кинематики механизмов; приемах конструирования деталей машин.

Структурно механизмы второго семейства описываются формулой [1, с. 87]

$$W_2 = 4n - 3p_5 - 2p_4 - p_3, \quad (1)$$

в которой обозначенными являются:  $W_2$  – подвижность механизма, определяющая число его степеней свободы,  $n$  – число подвижных звеньев механизма,  $p_5$ ,  $p_4$  и  $p_3$  – числа кинематических пар пятого, четвертого и третьего классов. Записав формулу (1) совместно с универсальной структурной системой профессора Дворникова Л.Т. [3], получим

$$\begin{cases} p_5 + p_4 + p_3 = \tau + (\tau - 1)n_{\tau-1} + (\tau - 2)n_{\tau-2} + \dots + in_i + \dots + 2n_2 + n_1 + n_0, \\ n = 1 + n_{\tau-1} + n_{\tau-2} + \dots + n_i + \dots + n_2 + n_1 + n_0, \\ W_2 = 4n - 3p_5 - 2p_4 - p_3, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\tau$  – параметр, определяющий сложность базисного звена цепи – от двухпарного ( $\tau=2$ ), трехпарного ( $\tau=3$ ) и т.д. до наиболее сложного;  $n_i$  – число звеньев, добавляющих в цепь по  $i$  кинематических пар.

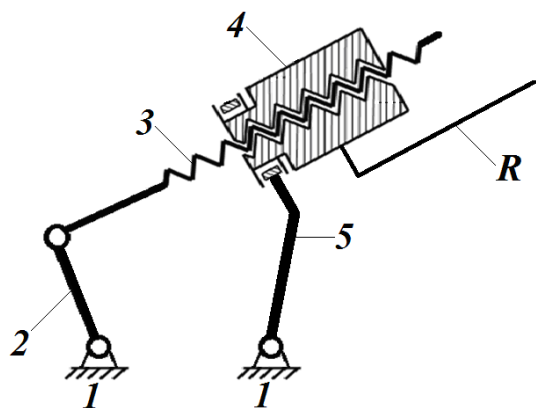
Очевидно, что наиболее простым механизмом второго семейства будет такой, в котором будут присутствовать только пары пятого класса ( $p_5$ ), а базисное звено  $\tau$  будет двухпарным ( $\tau=2$ ). Тогда при заданных параметрах, а также при  $W_2=1$  и  $n_0=0$ , т.е. при отсутствии в цепи звеньев, не добавляющих кинематических пар, система уравнений (2) запишется в виде

$$\begin{cases} p_5 = 2 + n_1, \\ n = 1 + n_1, \\ n = (3p_5 + 1)/4, \end{cases}$$

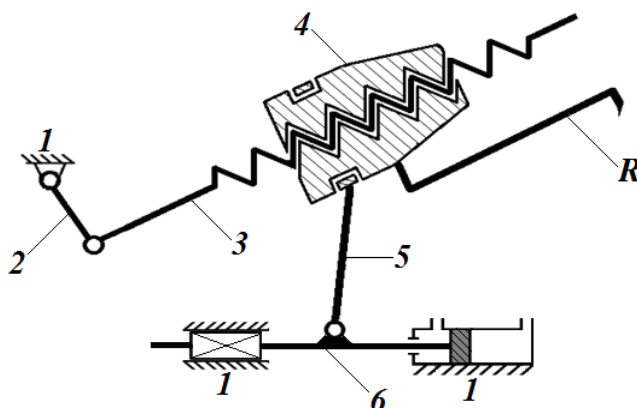
откуда из второго уравнения выразим параметр  $n_1$  и введем его в первое уравнение. Далее полученное выражение для  $p_5$  подставим в третье уравнение системы и определим, что  $n=4$ , тогда  $p_5=5$ . По найденному решению был построен механизм для воспроизведения

пространственных кривых [4] (рис. 1), новизна которого защищена патентом РФ. Механизм относится ко второму семейству и состоит из одного неподвижного звена – стойки 1 и четырех подвижных – кривошипа 2, шатуна 3, гайки 4 с резцом  $R$  и коромысла 5. Механизм позволяет воспроизводить сложное винтовое движение выходного звена (гайки 4) с резцом  $R$ , необходимое для обработки внутренних поверхностей деталей машин.

Преобразуем этот механизм путем добавления дополнительного звена - ползуна. Присоединим коромысло через вращательную кинематическую пару к ползуну, выполненному в виде штока с поршнем, входящим с гидроцилиндром, установленным на стойке, в поступательную пару. Полученный механизм (рис. 2) носит название пространственно-геликоидного (решение о выдаче патента РФ по заявке № 2011152125 от 26.07.2013) потому, что резец  $R$ , установленный на гайке 4, совершает сложное винтовое движение по геликоидальной траектории [5].



**Рис. 1. Механизм для воспроизведения пространственных кривых**



**Рис. 2. Пространственно-геликоидный механизм**

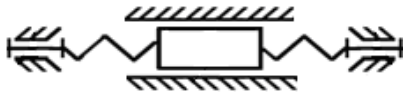
В состав механизма входит пять подвижных звеньев ( $n=5$ ), соединенных шестью кинематическими парами пятого класса ( $p_5=6$ ), тогда число степеней свободы этого механизма определится из формулы (1)

$$W_2=4n-3p_5=4\cdot 5-3\cdot 6=20-18=2,$$

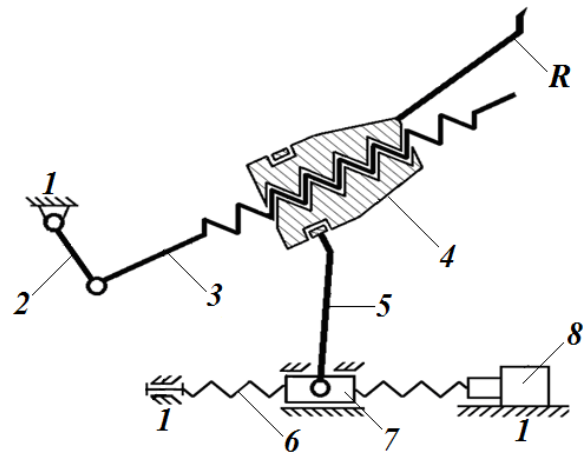
т.е. механизм имеет две степени свободы, и движение в нем одновременно задается двум звеньям – кривошипу 1 и ползуну 6 (подачей жидкости в поршневую или штоковую область гидроцилиндра).

Вернемся к схеме механизма для воспроизведения пространственных кривых и преобразуем ее снова, а именно присоединим коромысло через вращательную кинематическую пару к ползуну трехзвенного механизма четвертого семейства (рис. 3) с по-

движностью, равной единице ( $W_4=1$ ). Синтезированный таким образом механизм показан на рис. 4 – это механизм для обработки сложных внутренних поверхностей, кинематическая схема которого защищена патентом РФ [6].



**Рис. 3. Трехзвенный механизм четвертого семейства**



**Рис. 4. Механизм для обработки сложных внутренних поверхностей**

Механизм является неодносемейственным, т.е. включающим в свой состав механизмы разных семейств – второго и четвертого. Звенья 1, 2, 3, 4 и 5 образуют механизм второго семейства, подвижность которого определяется по формуле (1):

$$W_2=4\cdot4-3\cdot5=16-15=1.$$

Звенья 1, 6 и 7 образуют механизм четвертого семейства, подвижность которого может быть сосчитана по формуле [1, стр. 89]:

$$W_4=2n-p_5=2\cdot2-3=1.$$

Таким образом, общая подвижность механизма для обработки сложных внутренних поверхностей оказывается равной

$$W=W_2+W_4=1+1=2,$$

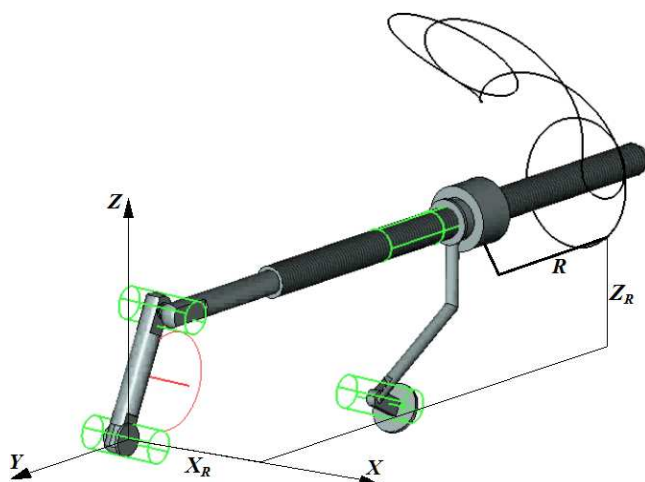
то есть этот механизм имеет две степени свободы, и движение в нем задается одновременно двум звеньям: первое - кривошипу 2, второе - ползуну 6 от двигателя 8 через винт 7, причем оба задаваемых движения могут быть направлены как в одном, так и в противоположных направлениях друг относительно друга.

Обратимся к кинематическому анализу разработанных механизмов:

- механизма для воспроизведения пространственных кривых (рис. 1);
- пространственно-геликоидного механизма (рис. 2);
- механизма для обработки сложных внутренних поверхностей (рис. 4).

Целью исследования кинематики этих механизмов является определение траектории движения их резцов  $R$ . Исследование проводилось с применением программного комплекса T-FLEX, позволяющего отследить изменение декартовых координат резцов  $R$  ( $X_R, Y_R, Z_R$ ) во времени. В программном комплексе были разработаны трехмерные параметрические модели механизмов, собранные из отдельных звеньев, соединенных между собой посредством сопряжений и взаимного расположения осей.

На рис. 1 показана трехмерная модель механизма для воспроизведения пространственных кривых и траектория движения резца  $R$ , построенная по результатам расчета, приведенным в таблице 1.

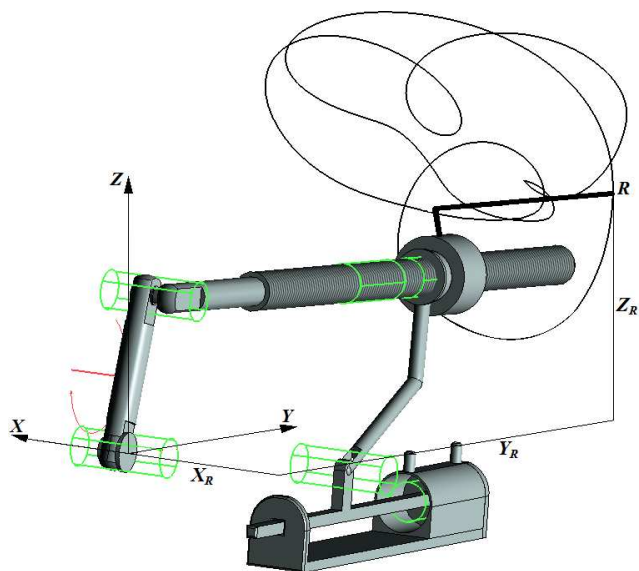


**Рис. 5. Траектория движения резца  $R$  механизма для воспроизведения пространственных кривых**

**Таблица 1. Анализ траектории движения резца  $R$  механизма по рис. 5**

№	Время $t$ , сек	Координата $X_R$ , мм	Координата $Y_R$ , мм	Координата $Z_R$ , мм
1	0,0	31,6	-241,6	336,4
2	0,4	39,2	-250,4	335,8
3	0,8	-6,9	-294,8	310,2
4	1,2	-40,0	-266,2	318,3
5	1,6	-26,0	-252,3	319,2
6	2,0	-20,5	-260,5	303,7
7	2,4	-34,7	-280,0	272,1
8	2,8	-31,6	-311,0	211,8
9	3,2	29,5	-311,2	183,7
10	3,6	6,0	-283,8	223,1
11	4,0	-32,3	-302,8	148,5
12	4,4	37,2	-299,9	155,6
13	4,8	28,1	-287,3	221,2
14	5,2	37,8	-286,7	258,9
15	5,6	3,5	-309,6	273,7
16	6,0	-31,6	-241,6	336,4
17	6,4	39,2	-250,4	335,8
18	6,8	-6,9	-294,8	310,2
19	7,2	-40,0	-266,2	318,3
20	7,6	-26,0	-252,3	319,2

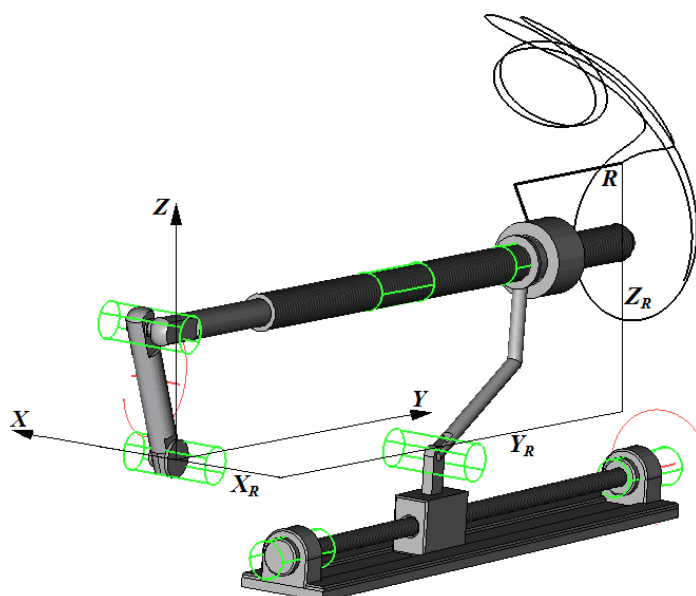
Трехмерные модели пространственно-геликоидного механизма и механизма для обработки сложных внутренних поверхностей с полученными траекториями движения их резцов приведены на рис. 6 и 7. В таблицах 2 и 3 соответственно даются числовые значения координат  $X_R$ ,  $Y_R$  и  $Z_R$  в зависимости от времени.



**Рис. 6. Траектория движения резца  $R$  пространственно-геликоидного механизма**

**Таблица 2. Анализ траектории движения резца  $R$  механизма по рис. 6**

№	Время $t$ , сек	Координата $X_R$ , мм	Координата $Y_R$ , мм	Координата $Z_R$ , мм
1	0,0	-28,5	336,1	241,2
2	0,4	-32,8	347,1	278,9
3	0,8	-36,1	322,1	310,1
4	1,2	-39,1	245,6	325,1
5	1,6	-9,4	137,8	309,0
6	2,0	40,0	91,56	261,3
7	2,4	-5,8	109,5	238,5
8	2,8	-24,3	130,5	236,1
9	3,2	-30,0	165,9	230,0
10	3,6	-39,3	261,4	258,1
11	4,0	-28,4	269,9	277,2
12	4,4	-13,9	300,5	286,4
13	4,8	-11,8	336,2	304,3
14	5,2	-8,4	358,9	332,8
15	5,6	-5,6	359,2	359,5
16	6,0	-3,2	327,6	372,2
17	6,4	18,8	275,6	360,2
18	6,8	39,4	232,6	323,0
19	7,2	14,6	207,9	277,6
20	7,6	-40,0	120,7	264,2



**Рис. 7. Траектория движения резца R механизма для обработки сложных внутренних поверхностей**

**Таблица 3. Анализ траектории движения резца R механизма по рис. 7**

№	Время $t$ , сек	Координата $X_R$ , мм	Координата $Y_R$ , мм	Координата $Z_R$ , мм
1	0,0	-37,9	341,2	232,4
2	0,4	-35,7	297,8	288,5
3	0,8	-1,1	244,6	318,2
4	1,2	23,5	166,9	313,31
5	1,6	-10,2	128,8	304,8
6	2,0	7,1	227,3	283,4
7	2,4	15,7	208,3	318,0
8	2,8	-19,7	263,3	310,2
9	3,2	2,1	299,0	302,8
10	3,6	35,7	326,3	277,0
11	4,0	36,4	269,9	244,3
12	4,4	8,0	346,1	226,3
13	4,8	-34,3	355,1	251,8
14	5,2	-36,6	299,4	292,9
15	5,6	-3,3	237,3	323,5
16	6,0	2,2	156,0	316,6
17	6,4	-35,0	205,2	294,8
18	6,8	36,5	209,9	310,9
19	7,2	-25,8	249,4	316,0
20	7,6	-24,1	295,4	304,9

### Заключение

Таким образом, в ходе проведенного исследования были разработаны три новые кинематические схемы механизмов для обработки сложных внутренних поверхностей деталей машин переменного сечения, новизна которых подтверждается патентами Российской Федерации. Создание трехмерных параметрических моделей разработанных механизмов позволяет не только определить их кинематические параметры и выявить траекторию движения режущего элемента, но и решить другую важную задачу, а именно: по заданной поверхности подобрать параметры механизма, обеспечивающие требуемое движение резца.

*Работа выполнена при финансовой поддержке в форме гранта DAAD и Министерства образования и науки Российской Федерации по программе «Михаил Ломоносов» (регистрационный № 11.7190.2013).*

### Список литературы

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов. - М. : Наука, 1965. - 776 с.
2. Дворников Л.Т. Проблемы исследования неодносемейственных механизмов // Материалы 6-й научно практической конференции по проблемам машиностроения металлургических и горных машин / Сибирская государственная горно-металлургическая академия. – Новокузнецк, 1997.
3. Дворников Л.Т. Начала теории структуры механизмов. – Новокузнецк : Изд-во СибГГМА, 1994. - 101 с.

4. Механизм для воспроизведения пространственных кривых / Дворников Л.Т., Фомин А.С. : Пат. № 2309051 С1 РФ, МПК В 43 L 11/00. № 2005141747; заяв. 30.12.2005; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30 – 4 с.; 1 ил.
5. Фиников С.П. Курс дифференциальной геометрии. - Гос. изд-во тех.-теор. литературы, 1952.
6. Пат. № 118921 U1 РФ, МПК В 43 L 11/00. Механизм для обработки сложных внутренних поверхностей / Дворников Л.Т., Фомин А.С. - № 2011152128; заяв. 20.12.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22 – 2 с.; 1 ил.

**Рецензенты:**

Дворников Леонид Трофимович, д.т.н., профессор, действительный член Международной Академии наук высшей школы, заведующий кафедрой теории механизмов и машин и основ конструирования, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г.Новокузнецк.

Живаго Эдуард Яковлевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теоретической механики, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», г. Новокузнецк.