



ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.865.8:621.01

А.К. ТОЛСТОШЕЕВ, канд. техн. наук, доц.

доцент кафедры «Детали машин»¹

E-mail: andrei.tolstosheev@yandex.ru

В.А. ТАТАРИНЦЕВ, канд. техн. наук, доц.

доцент кафедры «Детали машин»¹

E-mail: v_a_t52@mail.ru

¹Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

Поступила в редакцию 05.01.2019.

МЕТОДИКА СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫХ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РОБОТОВ

Статья посвящена повышению надежности и технологичности конструкций технологических роботов с параллельной кинематикой путем замены статически неопределимых манипуляторов статически определимыми механизмами. Предлагается методика структурного синтеза статически определимых манипуляторов посредством модификации структуры прототипа. Процедура включает выявление и устранение избыточных связей, проверку решения. Для определения числа степеней свободы механизма, выявления избыточных связей и проверки решения используется разработанная авторами методика структурного анализа. При структурном анализе манипулятор представляется иерархической структурой и рассматривается как параллельное соединение элементарных механизмов с незамкнутой кинематической цепью; как кинематическая цепь, состоящая из ведущей и ведомой частей; как совокупность звеньев и кинематических пар; как кинематическое соединение выходного звена и стойки. В статье реализованы следующие приемы устранения избыточных связей: увеличение подвижностей в кинематических парах, введение в кинематическую цепь разгрузочных звеньев и пассивных кинематических пар, исключение из кинематической цепи лишних звеньев и пар, увеличение подвижностей в одних кинематических парах одновременно с исключением ставших лишними других кинематических пар. Разработано несколько вариантов структурных схем самоустанавливающихся манипуляторов на базе механизма Ортоглайд. Предложенная методика позволяет определять число степеней свободы механизма, число и вид избыточных связей, устранять избыточные связи и на альтернативной основе строить структурные схемы статически определимых механизмов технологических роботов с параллельной кинематикой.

Ключевые слова: технологические роботы, параллельная кинематика, избыточные связи, статически определимые механизмы

Введение. Технологические роботы нового типа с параллельной кинематикой снабжены манипуляторами параллельной структуры с замкнутой кинематической цепью [1]. Замкнутая кинематическая цепь обеспечивает манипуляторам увеличение жесткости, грузоподъемности и точности, а также улучшение динамики вследствие уменьшения масс подвижных звеньев. Однако в замкнутой

кинематической цепи могут присутствовать контурные избыточные связи, превращающие манипулятор в статически неопределимый механизм. Замена статически неопределимых механизмов статически определимыми (самоустанавливающимися) механизмами позволяет существенно повысить надежность и технологичность конструкций машин различного назначения [2–5]. Но для меха-

низмов параллельной структуры эта задача решена частично и сводится к расчету числа избыточных связей [5–7] и исключению избыточных связей в плоских механизмах [4–5]. Часто избыточные связи не вводят явно в расчетные схемы, не определяют и не классифицируют [4, 8–10].

Целью данной работы является разработка методики структурного синтеза статически определенных механизмов параллельной структуры технологических роботов. Понятийный аппарат методики соответствует системе взглядов Л.Н. Решетова [2], внесшего значительный вклад в проектирование самоустанавливающихся механизмов различного назначения. Для расчета числа степеней свободы механизма и выявления избыточных связей применяем разработанную авторами методику структурного анализа [11–12]. Для исключения избыточных связей используем приемы, в том числе отработанные на плоских механизмах с одной степенью свободы [2–5, 13].

Методика структурного синтеза статически определимых механизмов. Структурный синтез в предлагаемой методике выполняют путем модификации структуры прототипа. Процедура включает выявление и устранение избыточных связей, проверку решения.

Выявление избыточных связей. Манипулятор представляют иерархической структурой, описываемой несколькими структурными моделями, что позволяет упростить анализ, более полно описать строение механизма и проверить решение.

Сначала определяют число степеней свободы манипулятора и вид движения выходного звена (платформы). Из замкнутой кинематической цепи выделяют элементарные механизмы, имеющие незамкнутые кинематические цепи и общее выходное звено — платформу. Множество D независимых возможных перемещений платформы есть пересечение множеств D_i ($i = 1, 2, \dots, m$) независимых возможных перемещений платформы в m элементарных механизмах:

$$D = D_1 \cap D_2 \cap \dots \cap D_m. \quad (1)$$

Число степеней свободы платформы есть мощность множества D :

$$W = |D|. \quad (2)$$

Для простых схем механизмов используют другой метод. Из кинематической цепи выделяют ведомую часть, состоящую из структурных групп, и ведущую часть, включающую стойку и начальные звенья. Число степеней свободы и число избыточных связей механизма подсчитывают суммированием соответствующих параметров в ведущей и ведомой частях кинематической цепи.

Далее определяют общее число избыточных связей q по формуле:

$$q = W - 6n + 5p_1 + 4p_2 + 3p_3 + 2p_4 + p_5, \quad (3)$$

где n — число подвижных звеньев; p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 — число одно-, двух-, трех-, четырех- и пятиподвиж-

ных кинематических пар соответственно; W — число степеней свободы механизма.

В плоских механизмах число тангенциальных избыточных связей в плоской схеме q_{Π} подсчитывают по формуле:

$$q_{\Pi} = W_{\Pi} - 3n + 2p_{1\Pi} + p_{2\Pi}, \quad (4)$$

где $W_{\Pi}, p_{1\Pi}, p_{2\Pi}$ — число степеней свободы, число одноподвижных и двухподвижных кинематических пар в плоской схеме механизма соответственно.

Для выявления избыточных связей, ограничивающих возможные перемещения платформы, манипулятор рассматривают как кинематическое соединение платформы и стойки и анализируют возможные перемещения платформы.

Исключение избыточных связей. Механизм представляют системой подвижностей и связей. Исключение одной из двух одинаковых связей возможно либо устранением этой связи из кинематической цепи, либо введением в кинематическую цепь дополнительной подвижности для этой связи. Учитывают, что одно звено вносит в кинематическую цепь шесть степеней свободы, а одна кинематическая пара — соответствующее ее классу число связей. Используют следующие приемы исключения избыточных связей: увеличение подвижностей в кинематических парах, введение в кинематическую цепь разгрузочных звеньев, исключение из кинематической цепи лишних звеньев, увеличение подвижностей в кинематических парах одновременно с исключением ставших лишними кинематических пар.

Модификация кинематической цепи приводит к появлению у механизма новых свойств, некоторые из которых могут улучшить его качество. Для увеличения числа схем самоустанавливающихся механизмов перераспределяют связи в пределах соединительной кинематической цепи и между соединительными цепями. Для выбора наиболее подходящего варианта структурной схемы используют дополнительные критерии, которые в работе не рассматриваются.

Проверка правильности исключения избыточных связей. Удаление из кинематической цепи обычной связи вместо избыточной, как и неправильное введение дополнительной подвижности, ведет к появлению в механизме вредной лишней подвижности при сохранении избыточной связи. Кроме этого, самоустанавливающийся механизм должен сохранять число степеней свободы и вид движения исполнительного органа, параллельную кинематику и кинематическую развязку движений. Для проверки выполняют структурный анализ.

Применение методики. В качестве прототипа рассмотрим поступательно направляющий механизм Ортоглайд (рисунок 1) [6, 12]. Определим число степеней свободы механизма и вид движения платформы 7, рассматривая манипулятор как параллельное соединение трех элементарных

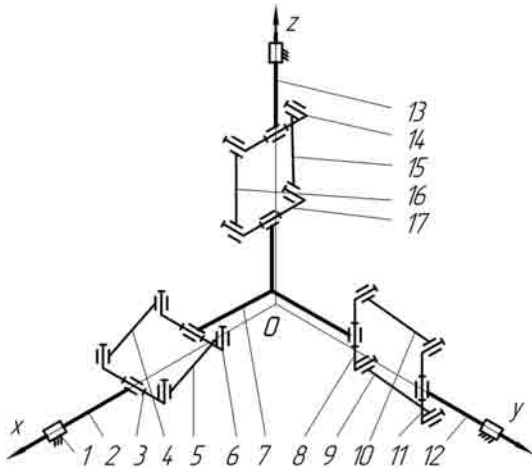


Рисунок 1 — Структурная схема механизма Ортоглайд
Figure 1 — Structural scheme of Orthoglide mechanism

механизмов MX , MY , MZ с незамкнутой кинематической цепью, каждый из которых содержит стойку, ползун, шарнирный параллелограмм и платформу.

В механизме MX возможные перемещения δx , δy , δz платформы вдоль координатных осей обеспечиваются соответственно подвижностями в поступательной паре, образованной звеньями 1, 2, в шарнирном параллелограмме из звеньев 3, 4, 5, 6 и во вращательной паре, образованной звеньями 2 и 3. Вращательная пара, образованная звеньями 6 и 7, обеспечивает элементарный поворот $\delta \varphi_y$ платформы вокруг оси Oy . Тогда множество независимых возможных перемещений платформы в механизме MX :

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y\}.$$

Аналогично имеем для механизма MY , состоящего из звеньев 1, 7–12, и механизма MZ , состоящего из звеньев 1, 7, 13–17, соответственно:

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x\};$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_z\}.$$

Множество независимых возможных перемещений платформы найдем по формуле (1):

$$D = D_1 \cap D_2 \cap D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z\}.$$

Число степеней свободы платформы найдем по формуле (2):

$$W = |D| = 3.$$

Для сравнения отметим, что расчет числа степеней свободы механизма по известной формуле А.П. Малышева для пространственных механизмов, которая широко используется при структурном анализе [4, 9], дает неверный результат:

$$W = 6n - 5p_1 = 6 \cdot 16 - 5 \cdot 21 = -9.$$

Отрицательное число степеней свободы свидетельствует о наличии в механизме избыточных (повторяющихся) связей.

Число избыточных связей механизма найдем по формуле (3):

$$q = W - 6n + 5p_1 = 3 - 6 \cdot 16 + 5 \cdot 21 = 12.$$

Из них девять избыточных связей являются нормальными и находятся в замкнутых контурах плоских механизмов шарнирных параллелограммов. Это следует из расчета числа избыточных связей в одном шарнирном параллелограмме по формуле (3):

$$q = 1 - 6 \cdot 3 + 5 \cdot 4 = 3,$$

а также расчета числа тангенциальных избыточных связей в его плоской схеме по формуле (4):

$$q_{\Pi} = 1 - 3 \cdot 3 + 2 \cdot 4 = 0.$$

Для локализации трех оставшихся избыточных связей представим манипулятор как кинематическое соединение платформы со стойкой. Из сравнения элементов множеств D_1 , D_2 , D_3 следует, что каждая соединительная кинематическая цепь запрещает два элементарных вращательных движения платформы относительно стойки, соответственно $\delta \varphi_x$ и $\delta \varphi_z$, $\delta \varphi_x$ и $\delta \varphi_y$, $\delta \varphi_y$ и $\delta \varphi_z$. Из шести связей три являются избыточными, запрещающими элементарные вращения платформы $\delta \varphi_x$, $\delta \varphi_y$, $\delta \varphi_z$.

Для устранения избыточных связей введем в каждую соединительную цепь разгрузочное звено и вращательную пару, а в шарнирных параллелограммах заменим две вращательные пары сферическими (рисунок 2). Получим

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\};$$

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_z\};$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y\}.$$

Множество независимых возможных перемещений платформы найдем по формуле (1):

$$D = \{\delta x, \delta y, \delta z\}.$$

Число степеней свободы платформы по формуле (2) $W = 3$. С учетом местных подвижностей звеньев 6, 8, 17 число степеней свободы механизма $W = 6$. Проверим по формуле (3):

$$q = 6 - 6 \cdot 19 + 5 \cdot 18 + 3 \cdot 6 = 0.$$

Заменим в каждом шарнирном параллелограмме прототипа все вращательные пары сферическими, одновременно исключив ставшие лишними звенья и пары, и получим новый самоустанавливающийся механизм

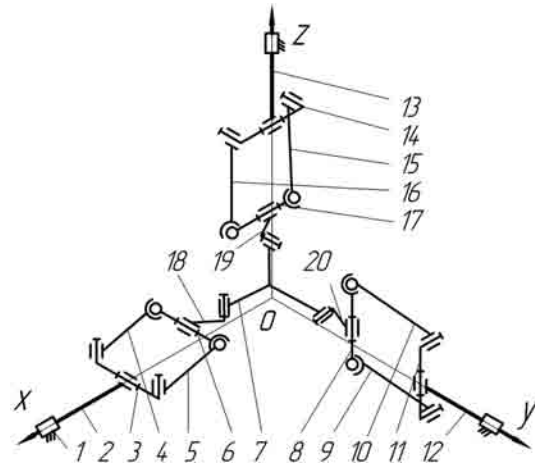


Рисунок 2 — Самоустанавливающийся механизм с разгрузочными звеньями
Figure 2 — Self-aligning mechanism with unloading chains

ливающийся механизм дельтапод (рисунок 3). Проверим решение. В состав кинематической цепи входит стойка 1, три начальных звена 2, 8, 9 и структурная группа из звеньев 3–7, 10, 11, для которой $q = 0$, $W = 6$. Поэтому число степеней свободы платформы 5 $W = 3$, число степеней свободы механизма $W = 9$, число избыточных связей $q = 0$. По формуле (3):

$$q = 9 - 6 \cdot 10 + 5 \cdot 3 + 3 \cdot 12 = 0.$$

Для определения вида движения платформы найдем множества ее независимых возможных перемещений в элементарных механизмах:

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y\};$$

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\};$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_z\}.$$

По формуле (1) для дельтапода:

$$D = \{\delta x, \delta y, \delta z\}.$$

Еще одну схему самоустанавливающегося механизма получим (рисунок 4), исключив из каждой соединительной цепи прототипа по одному лишнему звену с двумя вращательными парами, что равносильно удалению из кинематической цепи механизма 12 связей. Для манипулятора с карданными шарнирами имеем:

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\};$$

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_z\};$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y\};$$

$$D = \{\delta x, \delta y, \delta z\}, W = 3.$$

Проверим по формуле (3):

$$q = 3 - 6 \cdot 13 + 5 \cdot 15 = 0.$$

Если далее заменить карданные шарниры сферическими парами и сдвинуть три шарнира в точку K (см. рисунок 4), то получим другой самоустанавливающийся механизм (рисунок 5). В этом механизме платформа отсутствует, а исполнительный орган размещается в точке K . Для проверки выполним структурный анализ механизма, расчленив его кинематическую цепь на ведущую и ведомую

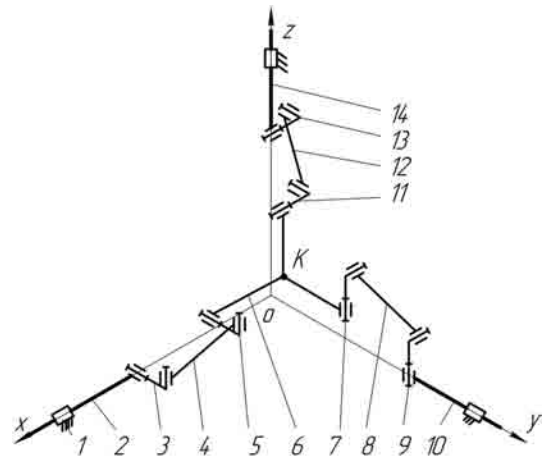


Рисунок 4 — Самоустанавливающийся механизм с карданными шарнирами
Figure 4 — Self-aligning mechanism with cardan joints

части. Ведущая незамкнутая цепь состоит из стойки 1, двух подвижных звеньев 2 и 3, двух кинематических пар $p_3 = 1$, $p_1 = 1$, имеет $q = 0$, $W = p_1 + 3p_3 = 4$.

Ведомая часть состоит из двух одинаковых структурных групп, для каждой из которых $n = 2$, $p_1 = 1$, $p_3 = 2$, $q = 0$, $W = 1$. Так как избыточные связи отсутствуют в ведущей части цепи и в структурных группах, то в кинематической цепи механизма $q = 0$. Число степеней свободы механизма суммируется и равно $W = 6$. Из формулы (3) также следует:

$$W = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 3 - 3 \cdot 5 = 6.$$

Из них три степени свободы обеспечивают произвольное движение точки K , а три местные подвижности обеспечивают вращение шатунов вокруг своей оси.

Рассмотрим вариант самоустанавливающегося механизма, имеющего разную структуру соединительных кинематических цепей (рисунок 6), для которого с учетом формул (1) и (2)

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z\};$$

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\};$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\};$$

$$D = \{\delta x, \delta y, \delta z\}, W = 3.$$

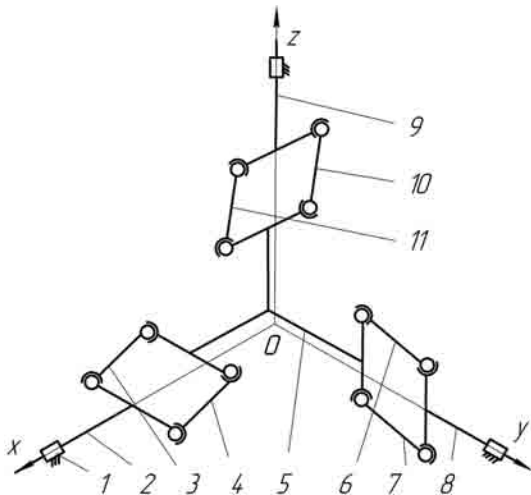


Рисунок 3 — Самоустанавливающийся дельтапод
Figure 3 — Self-aligning delta pod

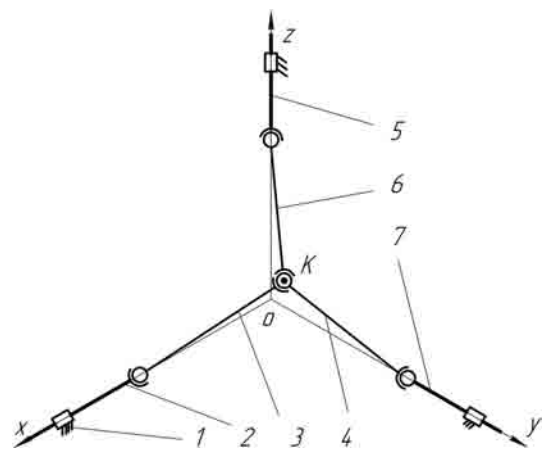


Рисунок 5 — Самоустанавливающийся механизм без платформы
Figure 5 — Self-aligning mechanism without platform

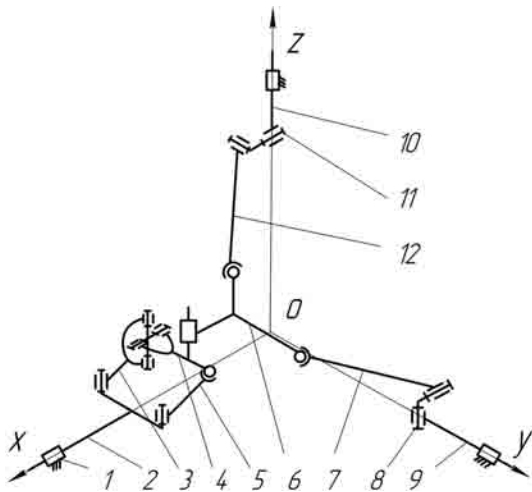


Рисунок 6 — Манипулятор с разной структурой соединительных цепей

Figure 6 — Manipulator with various structure of coupling chains

Проверим по формуле (3):

$$q = 3 - 6 \cdot 11 + 5 \cdot 10 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 3 = 0.$$

Все рассмотренные ранее механизмы обеспечивают поступательное перемещение платформы и имеют по три линейных двигателя. В этих механизмах движение платформы вдоль каждой из координатных осей связано с линейными перемещениями всех трех ползунов. Изменим конфигурацию осей вращательных пар манипулятора (см. рисунок 4) так, чтобы оси трех вращательных пар в каждом элементарном механизме были параллельны направляющей соответствующей поступательной пары. Тогда получим самоустанавливающийся механизм (рисунок 7) с кинематической развязкой по входу-выходу, при которой перемещения платформы по трем ортогональным направлениям могут независимо управляться тремя приводами, что существенно упрощает управление манипулятором.

Данный механизм относится к семейству изоглайдов, изоморфных механизмов с линейными двигателями, у которых каждый линейный двигатель перемещает платформу по соответствующей оси декартовой системы координат с отношением скоростей входа-выхода, равным единице.

Проверка. Множество независимых возможных перемещений платформы:

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y\};$$

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\};$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_z\};$$

$$D = \{x, y, z\}.$$

Манипулятор является поступательно направляющим механизмом с числом степеней свободы $W = 3$. По формуле (3)

$$q = 3 - 6 \cdot 13 + 5 \cdot 15 = 0.$$

Заключение. Предложенная методика позволяет определять число степеней свободы, число и вид избыточных связей в кинематической цепи механизма, устранять выявленные избыточные связи и на альтернативной основе строить структурные

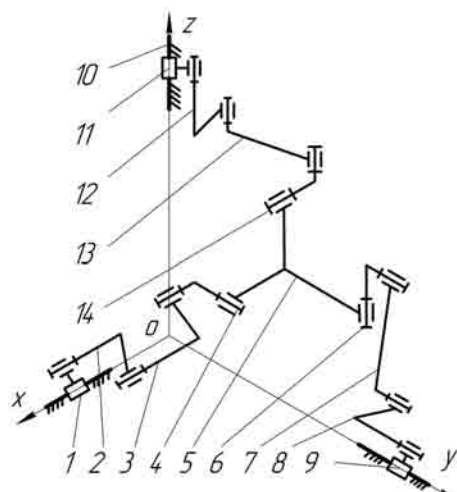


Рисунок 7 — Самоустанавливающийся изоглайд

Figure 7 — Self-aligning isoglide

схемы самоустанавливающегося механизмов, сохраняющих основные функциональные свойства. Применение самоустанавливающегося механизмов является одним из способов повышения надежности и технологичности конструкций технологических роботов с параллельной кинематикой.

Список литературы

1. Merlet, J.P. Parallel Robots / J.P. Merlet. — Dordrecht: Springer, 2006. — 417 p.
2. Решетов, Л.Н. Самоустанавливающиеся механизмы: справ. / Л.Н. Решетов. — М.: Машиностроение, 1991. — 288 с.
3. Егоров, О.Д. Метод структурного анализа механизмов робототехнических и мехатронных устройств / О.Д. Егоров, М.А. Буйнов // Механика машин, механизмов и материалов. — 2016. — № 2(35). — С. 15–22.
4. Календарев, А.В. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с четырьмя и пятью степенями свободы / А.В. Календарев, А.Е. Лысогорский, В.А. Глазунов // Изв. вузов. Машиностроение. — 2013. — № 3. — С. 7–10.
5. Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В.Л. Афонин [и др.]; под ред. В.Л. Афонина. — М.: Машиностроение, 2001. — 256 с.
6. Kong, X. Type Synthesis of Parallel Mechanisms / X. Kong, C. Gosselin. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. — 272 p.
7. Gogu, G. Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 1: Methodology / G. Gogu. — Dordrecht: Springer, 2008. — 720 p.
8. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с круговой направляющей и шестью степенями свободы / А.Г. Бюшгенс [и др.] // Справочник. Инженерный журнал с приложением. — 2014. — № 2. — С. 13–19.
9. Подзоров, П.В. Структурный анализ и классификация механизмов параллельной кинематики / П.В. Подзоров, В.В. Бушуев // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2004. — № 10. — С. 42–49.
10. Глазунов, В.А. Разработка механизмов параллельной структуры с четырьмя степенями свободы и четырьмя кинематическими цепями / В.А. Глазунов, В.А. Борисов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2017. — № 5. — С. 3–12.
11. Толстошеев, А.К. Структурный анализ механизмов роботов-станков с параллельной кинематикой / А.К. Толстошеев, В.А. Татаринцев // Вестн. Брянского гос. технического ун-та. — 2017. — № 1(54). — С. 33–43.
12. Толстошеев, А.К. Методика структурного анализа параллельных манипуляторов сельскохозяйственных роботов / А.К. Толстошеев, В.А. Татаринцев // Научное обозрение. — 2017. — № 22. — С. 37–42.
13. Толстошеев, А.К. Теория строения механизмов: учеб. пособие / А.К. Толстошеев. — Брянск: БГТУ, 2001. — 139 с.

TOLSTOSHEEV Andrey K., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department "Machine Parts"¹

E-mail: andrei.tolstosheev@yandex.ru

TATARINTSEV Vyacheslav A., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor of the Department "Machine Parts"¹

E-mail: v_a_t52@mail.ru

¹Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Received 05 January 2019.

TECHNIQUE OF STRUCTURAL SYNTHESIS OF STATICALLY DETERMINABLE PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS OF TECHNOLOGICAL ROBOTS

The article is devoted to improving the reliability and manufacturability of technological robots with parallel kinematics by replacing statically indeterminable manipulators with statically determinable mechanisms. The technique of structural synthesis of statically definable manipulators by modifying the structure of the prototype is proposed. The procedure involves identifying and eliminating redundant links, checking the solution. To determine the number of degrees of freedom of the mechanism, identify redundant links and verify the solution, the authors use the proposed methodology of structural analysis. In structural analysis, a manipulator is represented by a hierarchical structure and is considered as a parallel connection of elementary mechanisms with an open kinematic chain; as a kinematic chain consisting of leading and driven parts; as a set of links and kinematic pairs; as a kinematic connection of the output link and the rack. The article implements the following techniques for eliminating redundant links: mobility increase in kinematic pairs; introduction of unloading links and passive kinematic pairs to the kinematic chain; exclusion of extra links and pairs from the kinematic chain; increase in mobility in some kinematic pairs simultaneously with the exclusion of other kinematic pairs that have become superfluous. The authors developed several variants of structural schemes of self-aligning manipulators based on the Orthoglide mechanism. The proposed technique allows to determine the number of degrees of freedom of the mechanism, the number and type of redundant links, eliminate redundant links and, on an alternative basis, build structural diagrams of statically determinable mechanisms of technological robots with parallel kinematics.

Keywords: technological robots, parallel kinematics, redundant links, statically definable mechanisms

References

1. Merlet J.P. *Parallel Robots*. Dordrecht, Springer, 2006. 417 p.
2. Reshetov L.N. *Samoustanavlivayushchiesya mekhanizmy: spravochnik* [Self-aligning mechanisms: reference book]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1991. 288 p.
3. Egorov O.D., Buynov M.A. Metod strukturnogo analiza mekhanizmov robototekhnicheskikh i mekhatronnykh ustroystv [Methods of structural analysis of the mechanism of robotic and mechatronic devices]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2016, no. 2(35), pp. 15–22.
4. Kalendarev A.V., Lysogorskiy A.E., Glazunov V.A. Strukturnyy analiz mekhanizmov parallelnoy struktury s chetyrmya i pyatyu stepenyami svobody [Structural analysis of mechanisms of parallel structure with four and five degrees of freedom]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Proceedings of higher educational institutions. Machine building], 2013, no. 3, pp. 7–10.
5. Afonin V.L., et al. *Obrabatyvayushchee oborudovanie novogo pokoleniya. Kontseptsiya proektirovaniya* [Processing equipment of new generation. Design concept]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 256 p.
6. Kong X., Gosselin C. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2007. 272 p.
7. Gogu G. *Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 1: Methodology*. Dordrecht, Springer, 2008. 720 p.
8. Byushgens A.G., et al. Strukturnyy analiz mekhanizmov parallelnoy struktury s krugovoy napravlyayushchey i sheshtyu stepenyami svobody [Type analysis of parallel structure mechanisms with circle rail and six degrees of freedom]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniem* [Handbook. An engineering journal with appendix], 2014, no. 2, pp. 13–19.
9. Podzorov P.V., Bushuev V.V. Strukturnyy analiz i klassifikatsiya mekhanizmov parallelnoy kinematiki [Structural analysis and classification of mechanisms of parallel kinematics]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, automation, control], 2004, no. 10, pp. 42–49.
10. Glazunov V.A., Borisov V.A. Razrabotka mekhanizmov parallelnoy struktury s chetyrmya stepenyami svobody i chetyrmya kinematicheskimi tsepyami [Development of mechanisms of parallel structure with four degrees of freedom and four kinematic chains]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of machinery manufacture and reliability], 2017, no. 5, pp. 3–12.
11. Tolstosheev A.K., Tatarintsev V.A. Strukturnyy analiz mekhanizmov robotov-stanokov s parallelnoy kinematikoy [Structural analysis of robot machine mechanisms with parallel kinematics]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Bryansk State Technical University], 2017, no. 1(54), pp. 33–43.
12. Tolstosheev A.K., Tatarintsev V.A. Metodika strukturnogo analiza parallelnykh manipulyatorov selskokhozyaystvennykh robotov [Method of structural analysis of parallel manipulators of agricultural robots]. *Nauchnoe obozrenie* [Science review], 2017, no. 22, pp. 37–42.
13. Tolstosheev A.K. *Teoriya stroeniya mekhanizmov: uchebnoe posobie* [Theory of mechanism construction: educational manual]. Bryansk, Bryanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet Publ., 2001, 139 p.