

А. К. Толстошеев, канд. техн. наук, доц., andrei.tolstosheev@yandex.ru,

В. А. Татаринцев, канд. техн. наук, доц., v_a_t52@mail.ru,

Брянский государственный технический университет

Проектирование статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой

Работа посвящена повышению надежности и технологичности конструкций мехатронных машин с параллельной кинематикой путем замены статически неопределимых манипуляторов статически определимыми механизмами. Предлагается методика, в которой проектирование статически определимых манипуляторов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой выполняется путем модификации структуры прототипов и включает три этапа: выявление и анализ избыточных связей, устранение избыточных связей, проверка правильности исключения избыточных связей. Для определения числа степеней свободы механизма, выявления избыточных связей и проверки решения используется предложенная авторами методика структурного анализа механизмов параллельной структуры. 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 разрузочных 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, сохраняющих основные функциональные свойства прототипа. Для увеличения числа схем самоустанавливающихся механизмов используется перераспределение подвижностей и связей в пределах соединительной кинематической цепи и между соединительными кинематическими цепями. 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 мехатронных машин с параллельной кинематикой.

Ключевые слова: технологические мехатронные машины, параллельная кинематика, избыточные связи, статически определимые манипуляторы

Введение

Технологические мехатронные машины с параллельной кинематикой, получившие распространение в последние годы [1, 2], снабжены манипуляторами параллельной структуры с замкнутой кинематической цепью и несколькими степенями свободы. Замкнутая кинематическая цепь и параллельная кинематика обеспечивают этим механизмам по сравнению с традиционными манипуляторами с последовательной кинематикой большую жесткость, грузоподъемность и точность, а также улучшение динамики вследствие уменьшения масс подвижных звеньев. Однако в замкнутой кинематической цепи могут присутствовать контурные избыточные связи, отсутствующие в незамкнутой цепи.

Избыточными связями называют повторяющиеся связи, устранение которых не увеличивает подвижность механизма [3]. Механизмы без избыточных связей являются статически определимыми. Для статически определимых механизмов число неизвестных реакций связей равно числу уравнений равновесия (кинетостатики),

содержащих эту реакцию. Для статически неопределимых механизмов реакции связей нельзя определить из уравнений кинетостатики, так как число неизвестных больше числа уравнений. Каждая избыточная связь увеличивает статическую неопределимость механизма на единицу.

В статически неопределимом механизме с избыточными связями вследствие внешних температурных и силовых воздействий, а также погрешностей при изготовлении и сборке ранее одинаковые связи становятся разными. Вместо избыточных связей в механизме появляются лишние связи, которые затрудняют монтаж и демонтаж механизма, вызывают деформации звеньев при сборке и движении механизма, а также неравномерное распределение нагрузки, повышенное трение и износ в сопряжениях, приводят к существенному увеличению времени обкатки и снижению долговечности. Поэтому к механизмам с избыточными связями предъявляют повышенные требования по точности изготовления и монтажа звеньев и их соединений. Замена статически неопределимых механизмов статически определимыми (самоустанавливающимися) меха-

низмами позволяет существенно повысить надежность и технологичность конструкций машин различного назначения [3—7].

Проектирование механизмов с параллельной кинематикой выполняют, как правило, по критериям обеспечения заданного числа степеней свободы, требуемого вида движения выходного звена, полной или частичной кинематической развязки приводов [7—15]. Критерий отсутствия избыточных связей используется только в некоторых задачах синтеза, поэтому избыточные связи могут присутствовать в механизмах технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой, а обнаружить их можно в процессе структурного анализа. В то же время для анализа структуры манипуляторов с параллельной кинематикой часто используют методики, в которых избыточные связи не входят явно в математические модели и не определяются [8—11, 16]. Задача исключения избыточных связей из замкнутых кинематических цепей механизмов параллельной структуры не решена в полном объеме и сводится к расчету числа избыточных связей [7, 12, 13] и устранению избыточных связей в замкнутых контурах плоских механизмов [8, 9].

Постановка задачи

Целью данной работы является разработка методики проектирования статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой. При разработке методики учитываем опыт проектирования самоустанавливающихся механизмов как мехатронных, так и немехатронных машин. Понятийный аппарат и общая структура методики приняты по аналогии с работами Л. Н. Решетова [3, 4], внесшего значительный вклад в теорию и практику проектирования самоустанавливающихся механизмов машин различного назначения. Для расчета числа степеней свободы механизма, выявления и классификации избыточных связей применяем предложенную авторами методику структурного анализа манипуляторов с параллельной кинематикой [17, 18]. Для исключения избыточных связей из кинематических цепей пространственных механизмов параллельной структуры с несколькими степенями свободы используем приемы, в том числе отработанные на плоских механизмах с одной степенью свободы [3—9, 19].

Методика проектирования статически определимых механизмов

Проектирование статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой в предлагаемой методике выполняется путем анализа структуры прототипа и внесения в нее необходимых изменений и включает три вида действий: *подготовительные* — выявление, анализ и классификация избыточных связей, *основные* — устранение избыточных связей и *проверочные*.

1. Выявление, анализ и классификация избыточных связей

Для известной конструкции манипулятора технологической мехатронной машины в три этапа выполняется структурный анализ с использованием предложенной авторами методики [17, 18]. При этом система (манипулятор) представляется иерархической структурой, описываемой несколькими структурными моделями, которые отражают разные взгляды на строение механизма. Использование нескольких моделей позволяет выбрать из их числа структуры, наиболее подходящие для анализа строения рассматриваемого механизма, дает возможность более полно описать структуру системы, локализовать избыточные связи и проверить решение.

На первом этапе определяется число степеней свободы механизма и вид движения выходного звена. Механизм представляется состоящим из нескольких элементарных механизмов, каждый из которых обладает самостоятельными свойствами и незамкнутой кинематической цепью. При жестком параллельном соединении выходные звенья элементарных механизмов сливаются в одно звено — платформу, которая является выходным звеном составного механизма параллельной структуры с замкнутой кинематической цепью.

Множество D независимых возможных перемещений платформы механизма параллельной структуры является пересечением 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

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

Следует учитывать, что по формулам (1) и (2) подсчитывается число степеней свободы платформы в рассматриваемом положении механизма, которое может включать в себя мгновенную степень свободы, появляющуюся при образовании мгновенной избыточной связи.

Для значительного числа манипуляторов мехатронных машин с параллельной кинематикой число степеней свободы удобнее и проще определять, используя другую структурную модель, в которой кинематическая цепь механизма разделяется на ведущую и ведомую части, обладающие разными кинематическими и структурными свойствами. Ведущая часть является незамкнутой кинематической цепью, включает стойку и начальные звенья, которым приписывают обобщенные координаты. Ведомая часть является замкнутой кинематической цепью, состоит из структурных групп. Число структурных групп ограничено, структура наиболее часто встречающихся групп известна, в том числе известно число избыточных связей и местных подвижностей. Мысленно отсоединяя от кинематической цепи известные структурные группы, определяют ее ведущую часть. Число степеней свободы и число избыточных связей механизма определяют суммированием соответствующих параметров в ведущей и ведомой частях кинематической цепи.

На втором этапе определяется число и вид избыточных связей в кинематической цепи механизма. При этом используется структурная модель, в которой манипулятор рассматривается как кинематическая цепь, элементами которой являются кинематические пары и звенья. Число избыточных связей q механизма подсчитывается по следующей структурной формуле:

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

где n — число подвижных звеньев; p_1, p_2, p_3 — соответственно число одноподвижных, двухподвижных и трехподвижных кинематических пар; W — число степеней свободы механизма.

В поверхностных механизмах (плоских и сферических) избыточные связи, как и любые другие, разделяем на тангенциальные, ограничивающие движения изображений звеньев на

поверхности, и нормальные, ограничивающие перемещения, перпендикулярные к поверхности. Для выявления тангенциальных избыточных связей в плоских или сферических механизмах используется, соответственно, плоская или сферическая структурная схема, в которой изображаются проекции звеньев и кинематических пар.

Число тангенциальных избыточных связей в плоской схеме плоского механизма q_{π} подсчитывается по структурной формуле:

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

где W_{π} — число степеней свободы механизма в его плоской схеме; $p_{1\pi}$ — число одноподвижных кинематических пар в плоской схеме механизма.

Формула (4) используется также для подсчета числа тангенциальных избыточных связей сферического механизма.

Разделяем контурные избыточные связи по месту действия на связи, ограничивающие движение выходного звена, и связи в кинематических цепях, соединяющие платформу и стойку.

На третьем этапе для выявления избыточных связей, наложенных на движение выходного звена, анализируются множества независимых возможных перемещений платформы D_i , определяются и суммируются связи со стороны каждой кинематической цепи, соединяющей платформу и стойку. Механизм параллельной структуры рассматривается при этом как кинематическое соединение выходного звена и стойки, конструктивно заменяющее кинематическую пару.

2. Исключение избыточных 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. Способы устранения избыточных связей: замена одних кинематических пар на другие с большим числом подвижностей; введение в кинематическую цепь разгрузочных звеньев и пассивных кинематических пар; исключение из кинематической цепи лишних звеньев и кинематических пар; увеличение подвижностей в кинематических парах одновременно с исключением ставших лишними других кинематических пар. При этом подсчитывается баланс степеней свободы

и связей, учитывается, что одно звено вносит в кинематическую цепь шесть степеней свободы, а каждая кинематическая пара — соответствующее ее классу число связей.

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

3. 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, необходимо учитывать, что изменение структуры механизма неизбежно ведет к изменению его свойств. Самоустанавливающийся механизм должен сохранять число степеней свободы и вид движения исполнительного органа, параллельную кинематику и кинематическую развязку движений. Для проверки выполняется структурный анализ [17, 18].

Применение методики

В качестве примера рассмотрим известный [12] поступательно направляющий механизм Ортоглайд (рис. 1). Манипуляторы, обеспечивающие поступательное перемещение выходного звена, широко применяются при сборке и металлообработке [2]. Кинематическая цепь механизма включает платформу 7 (выходное звено), стойку 1 и три соединяющие их одинаковые по составу кинематические цепи, содержащие шарнирные параллелограммы и ползуны: 2, 12, 13. Ползуны образуют приводные поступательные пары с неподвижными направляющими, ориентированными вдоль осей прямоугольной декартовой системы координат.

Определим число степеней свободы механизма и вид движения выходного звена, рассматривая манипулятор как параллельное со-

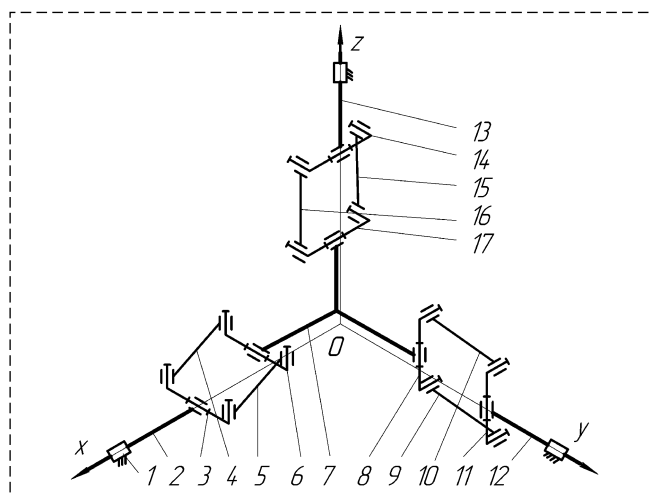


Рис. 1. Структурная схема механизма Ортоглайд
Fig. 1. Structural diagram of the Orthoglide mechanism

единение трех элементарных механизмов X , Y , Z с незамкнутой кинематической цепью, включающей стойку, ползун, шарнирный параллелограмм и платформу. В механизме X возможные перемещения δx , δy , δz платформы вдоль координатных осей обеспечиваются соответственно подвижностями в поступательной паре, образованной звеньями 1 и 2, шарнирном параллелограмме из звеньев 3, 4, 5, 6 и 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 X имеет вид

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

Аналогично имеем для механизма Y , состоящего из звеньев 1, 7–12, и механизма Z , состоящего из звеньев 1, 7, 13–17, соответственно

$$D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_z\}, D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x\}.$$

Множество независимых возможных перемещений D платформы составного механизма 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):

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

Число избыточных связей в кинематической цепи 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, находятся в трех замкнутых контурах плоских механизмов шарнирных параллелограммов. Это следует из расчета общего числа избыточных связей в замкнутом контуре одного плоского шарнирного параллелограмма при $n = 3$, $p_1 = 4$, $W = 1$ по формуле (3):

$$q = W - 6n + 5p_1 = 1 - 6 \cdot 3 + 5 \cdot 4 = 3,$$

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

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

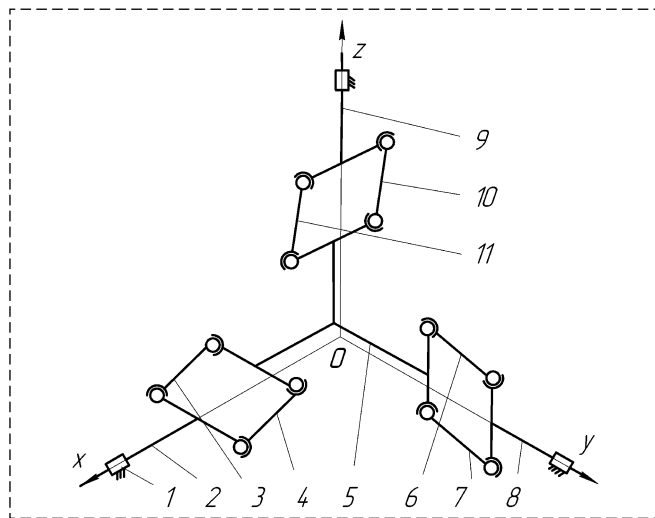


Рис. 2. Самоустанавливающийся механизм с разгрузочными звеньями

Fig. 2. Self-aligning mechanism with unloading links

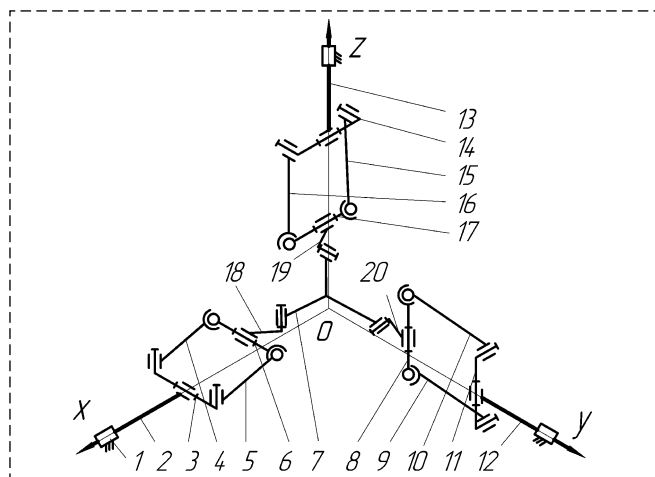


Рис. 3. Самоустанавливающийся механизм дельтапод

Fig. 3. Self-aligning deltapod mechanism

Для выявления трех других избыточных связей представим манипулятор как кинематическое соединение платформы со стойкой. Из сравнения элементов множеств D_1 , D_2 , и 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 $\delta\varphi_z$. Три соединительные цепи накладывают на движение платформы шесть связей, из которых три — избыточные, запрещающие элементарные вращательные движения платформы: $\delta\varphi_x$, $\delta\varphi_y$, $\delta\varphi_z$.

Для устранения всех избыточных связей в кинематической цепи механизма Ортоглайд введем в каждую соединительную цепь дополнительное разгрузочное звено и вращательную пару, а в плоских шарнирных параллелограммах заменим две вращательные пары на сферические трехподвижные пары (рис. 2).

Проверим решение. Для аналогичных элементарных механизмов

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

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

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

Множество независимых возможных перемещений D платформы механизма параллельной структуры по формуле (1):

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

Самоустанавливающийся манипулятор является поступательно направляющим механизмом с числом степеней свободы платформы $W = |D| = 3$.

С учетом местных подвижностей в плоских параллелограммах 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 механизма Ортоглайд все вращательные пары сферическими, одновременно исключив ставшие при этом лишними звенья и пары, и получим новый самоустанавливающийся механизм — поступательно направляющий дельтапод (рис. 3). Проверим решение. В состав кинематической цепи входят стойка 1, три начальных звена 2, 8, 9 и статически определяя

структурная группа с шестью поводками, обладающая шестью местными подвижностями [17]. Поэтому число степеней свободы механизма $W = 9$, число степеней свободы платформы $W = 3$, число избыточных связей $q = 0$. Проверка по формуле (3):

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

Для определения вида движения выходного звена найдем множества независимых возможных перемещений платформы в элементарных механизмах, учитывая подвижности в кинематических парах:

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

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

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

Множество независимых возможных перемещений D платформы составного механизма по формуле (1):

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

Еще одну схему самоустанавливающегося механизма получим (рис. 4), исключив из каждой соединительной цепи механизма Ортоглайд по одному лишнему звену с двумя вращательными парами, что равносильно удалению из кинематической цепи механизма 12 связей. Получим параллельный самоустанавливающийся механизм с карданными (универсальными) шарнирами, для которого

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

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

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

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

Проверим по формуле (3):

$$q = W - 6n + 5p_1 = 3 - 6 \cdot 13 + 5 \cdot 15 = 0.$$

Если далее заменить универсальные шарниры, соединяющие звенья 4, 8, 12 с платформой 6 и ползунами, на сферические пары и сдвинуть три шарнира в точку K (центр платформы), то получим самоустанавливающийся механизм (рис. 5). В этом механизме платформа отсутствует, а исполнительный орган раз-

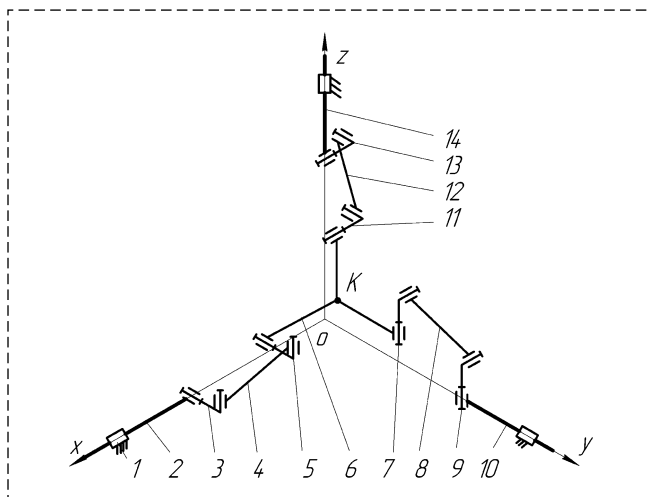


Рис. 4. Самоустанавливающийся механизм с карданными шарнирами

Fig. 4. Self-aligning mechanism with cardan joints

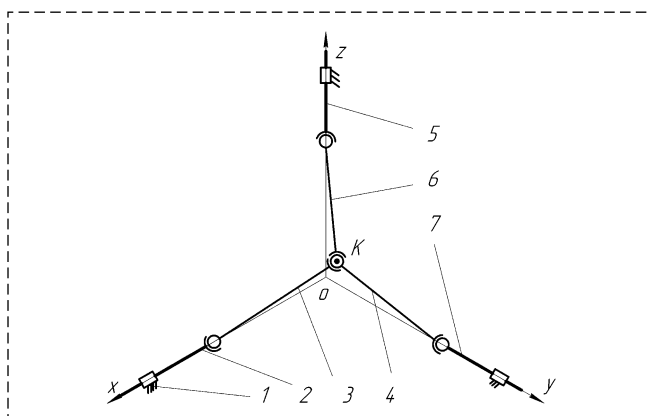


Рис. 5. Самоустанавливающийся механизм без платформы

Fig. 5. Self-aligning mechanism without platform

мещается в точке K . Кинематическая схема, построенная на основе данной структуры, является кинематической моделью для расчета механизмов типа Ортоглайд [20]. Для проверки выполним структурный анализ механизма, расчленив его кинематическую цепь на ведущую и ведомую 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 $W = 6$, так как подвижности в ведущей и ведомой частях кинематической цепи суммируются. При $n = 6$, $p_1 = 3$, $p_3 = 5$, $q = 0$ из формулы (3) также следует

$$W = 6n - 5p_1 - 3p_3 = 6 \cdot 6 - 5 \cdot 3 - 3 \cdot 5 = 6.$$

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

Рассмотрим вариант самоустанавливающегося механизма, имеющего разную структуру

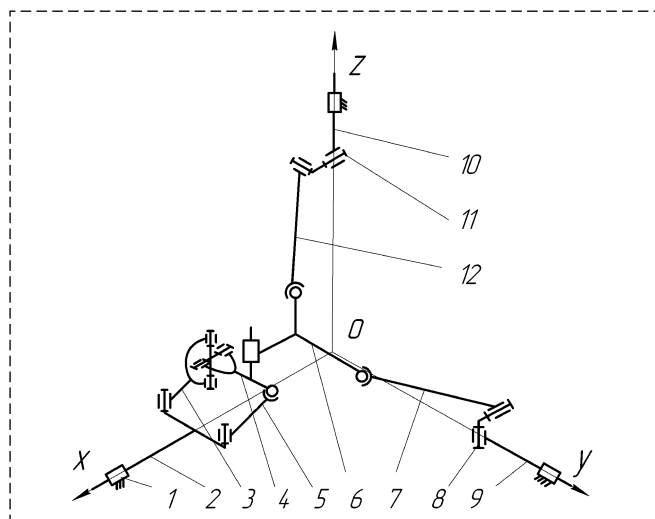


Рис. 6. Самоустанавливающийся механизм с разным составом соединительных цепей

Fig. 6. Self-aligning mechanism with different structure of connecting chains

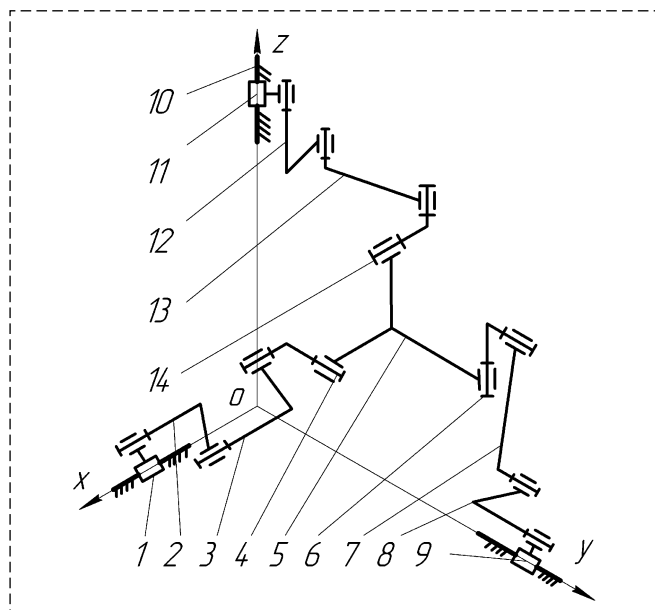


Рис. 7. Самоустанавливающийся изоморфный механизм

Fig. 7. Self-aligning isomorphic mechanism

соединительных кинематических цепей (рис. 6), для которого с учетом формул (1) и (2) имеем

$$D_1 = \{\delta x, \delta y, \delta z\}, D_2 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\},$$

$$D_3 = \{\delta x, \delta y, \delta z, \delta \varphi_x, \delta \varphi_y, \delta \varphi_z\}, D = \{\delta x, \delta y, \delta z\}, W = 3.$$

Проверим по формуле (3) при $n = 11$, $p_1 = 10$, $p_2 = 1$, $p_3 = 3$, $W = 3$:

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

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 входных звеньев.

Изменим конфигурацию осей вращательных пар в штангах манипулятора с карданными шарнирами (см. рис. 4) так, чтобы оси трех вращательных пар в каждом элементарном механизме были параллельны направляющей соответствующей поступательной пары. Тогда получим самоустанавливающийся механизм (рис. 7) с кинематической развязкой по входу-выходу, при которой три 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. Самоустанавливающийся изоглайд (рис. 7) является кинематическим аналогом Триптерона [12], но не содержит избыточных связей.

Проверим решение. Множество независимых возможных перемещений платформы в элементарных механизмах

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

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

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

Число степеней свободы платформы в каждом из элементарных механизмов X , Y , Z по формуле (2):

$$W_1 = |D_1| = |D_2| = |D_3| = 5.$$

Множество независимых возможных перемещений D платформы механизма параллельной структуры по формуле (1):

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

Манипулятор является поступательно направляющим механизмом с числом степеней свободы платформы

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

Проверка по формуле (3) при $n = 13$, $p_1 = 15$, $W = 3$ дает:

$$q = W - 6n + 5p_1 = 3 - 6 \cdot 13 + 5 \cdot 15 = 0.$$

Заключение

Предложенная методика проектирования статически определимых механизмов технологических мехатронных машин с параллельной кинематикой позволяет определять число степеней свободы, число и вид избыточных связей в кинематической цепи механизма, а также устранять выявленные избыточные связи и на альтернативной основе строить структурные схемы самоустанавливающихся механизмов с сохранением основных функциональных свойств. Применение структурных схем манипуляторов без контурных избыточных связей является одним из способов повышения надежности и технологичности конструкций мехатронных машин с параллельной кинематикой.

Список литературы

1. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
2. Merlet J. P. Parallel Robots. The Netherlands Dordrecht: Springer, 2006. 417 p.
3. Решетов Л. Н. Конструирование рациональных механизмов. М.: Машиностроение, 1972. 256 с.

4. Решетов Л. Н. Самоустанавливающиеся механизмы: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 288 с.
5. Дворников Л. Т., Гудимова Л. Н., Большаков Н. С. Опыт исключения избыточных связей в шестизвенных плоских механизмах // Известия вузов. Машиностроение. 2007. № 5. С. 29–38.
6. Егоров О. Д., Буйнов М. А. Структурный анализ механизмов мехатронных и робототехнических устройств // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 17, № 4. С. 239–244.
7. Обрабатывающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В. Л. Афонин, А. Ф. Крайнев, В. Е. Ковалев [и др.] / Под ред. В. Л. Афонина. М.: Машиностроение, 2001. 256 с.
8. Календарев А. В., Лысогорский А. Е., Глазунов В. А. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с четырьмя и пятью степенями свободы // Известия вузов. Машиностроение. 2013. № 3. С. 7–10.
9. Ширинкин М. А. Структурный анализ пространственных механизмов параллельной структуры с четырьмя и шестью степенями свободы // Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 2. С. 17–21.
10. Бюшгенс А. Г., Глазунов В. А., Зайчик Л. Е., Скворцов С. А. Структурный анализ механизмов параллельной структуры с круговой направляющей и шестью степенями свободы: Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2014. № 2. С. 13–19.
11. Носова Н. Ю., Глазунов В. А., Палочкин С. В., Терехова А. Н. Синтез механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 5. С. 34–40.
12. Kong X., Gosselin C. Type Synthesis of Parallel Mechanisms. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. 272 p.
13. Gogu G. Structural Synthesis of Parallel Robots, Part 1-Methodology. Dordrecht: Springer, 2008. 720 p.
14. Данилин П. О., Тывес Л. И., Глазунов В. А. Групповая кинематическая развязка двигателей в механизмах параллельной структуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 3. С. 27–35.
15. Глазунов В. А., Борисов В. А. Разработка механизмов параллельной структуры с четырьмя степенями свободы и четырьмя кинематическими цепями // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 5. С. 3–12.
16. Подзоров П. В., Бушуев В. В. Структурный анализ и классификация механизмов параллельной кинематики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 10. С. 42–49.
17. Толстосhev А. К., Татаринцев В. А. Структурный анализ механизмов роботов-станков с параллельной кинематикой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 1 (54). С. 33–43.
18. Толстосhev А. К., Татаринцев В. А. Методика структурного анализа параллельных манипуляторов сельскохозяйственных роботов // Научное обозрение. 2017. № 22. С. 37–42.
19. Толстосhev А. К. Теория строения механизмов: учеб. пособие. Брянск: Изд-во БГТУ, 2001. 139 с.
20. Pashkevich A., Wenger P., Chablat D. Design strategies for the geometric synthesis of Orthoglide-type mechanisms // Mechanism and Machine Theory. 2005. Vol. 40, № 8. P. 907–930.

Designing Statically Determinable Mechanisms of Technological Mechatronic Machines with Parallel Kinematics

A. K. Tolstoshev, andrei.tolstoshev@yandex.ru, V. A. Tatarintsev, v_a_t52@mail.ru,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241035, Russian Federation

Corresponding author: Tatarintsev Vyacheslav A., Cand. of Tech. Sc.,
Associate Professor of the Machine Parts Department, Bryansk State Technical University,
Bryansk, 241035, Russian Federation, e-mail: v_a_t52@mail.ru

Accepted on April 08, 2019

Abstract

The work is devoted to improving the reliability and manufacturability of mechatronic machine designs with parallel kinematics by replacing statically indeterminate manipulators with statically determinable mechanisms. A technique is proposed in which the design of statically determinable manipulators of technological mechatronic machines with parallel kinematics is performed by modifying the structure of prototypes and includes three steps: identifying and analyzing redundant links, eliminating redundant links, checking the correctness of eliminating redundant links. To determine the number of degrees of freedom of the mechanism, identify redundant links, and verify the solution, the authors use the proposed methodology for structural analysis of parallel structure mechanisms. 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, which retain the basic functional properties of the prototype. To increase the number of self-aligning mechanism diagrams, the redistribution of mobilities and links within the connecting kinematic chain and between connecting kinematic chains is used. The proposed methodics allow 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 mechatronic machines with parallel kinematics.

Keywords: technological mechatronic machines, parallel kinematics, redundant links, statically definable manipulators

For citation:

Tolstosheev A. K., Tatarintsev V. A. Designing Statically Determinable Mechanisms of Technological Mechatronic Machines with Parallel Kinematics, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 7, pp. 428–436.

DOI: 10.17587/mau.20.428-436

References

1. **Poduraev Yu. V.** Mechatronics: basics, methods, application: educational manual for university students, Moscow, Mashinostroenie, 2006, 256 p. (in Russian).
2. **Merlet J. P.** Parallel Robots, The Netherlands Dordrecht, Springer, 2006, 417 p.
3. **Reshetov L. N.** Designing rational mechanisms, Moscow, Mashinostroenie, 1972, 256 p. (in Russian).
4. **Reshetov L. N.** Self-aligning mechanisms. Reference book, Moscow, Mashinostroenie, 1991, 288 p. (in Russian).
5. **Dvornikov L. T., Gudimova L. N., Bol'shakov N. S.** *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2007, no 5, pp. 29–38 (in Russian).
6. **Egopov O. D., Buynov M. A.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no 4, pp. 239–244 (in Russian).
7. **Afonin V. L., Kraynev A. F., Kovalev V. E.** et al. Processing equipment of the new generation. Design concept. Moscow, Mashinostroenie, 2001, 256 p. (in Russian).
8. **Kalendarev A. V., Lysogorskiy A. E., Glazunov V. A.** *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2013, no 3, pp. 7–10 (in Russian).
9. **Shirinkin M. A.** *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 2011, no 2, pp. 17–21 (in Russian).
10. **Byushgens A. G., Glazunov V. A., Zaychik L. E., Skvortsov S. A.** *Spravochnik. Inzhenernyy Zhurnal s Prilozheniem*, 2014, no 2, pp. 13–19 (in Russian).
11. **Nosova N. Yu., Glazunov V. A., Palochkin S. V., Terekhova A. N.** *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2014, no 5, pp. 34–40 (in Russian).
12. **Kong X., Gosselin C.** Type Synthesis of Parallel Mechanisms, Berlin, Heidelberg, Springer, 2007, 272 p.
13. **Gogu G.** Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 1-Methodology, Dordrecht, Springer, 2008, 720 p.
14. **Danilin P. O., Tyves L. I., Glazunov V. A.** *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2010, no 3, pp. 27–35 (in Russian).
15. **Glazunov V. A., Borisov V. A.** *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin*, 2017, no 5, pp. 3–12 (in Russian).
16. **Podzorov P. V., Bushuev V. V.** *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2004, no 10, pp. 42–49 (in Russian).
17. **Tolstosheev A. K., Tatarintsev V. A.** *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no 1(54), pp. 33–43 (in Russian).
18. **Tolstosheev A. K., Tatarintsev V. A.** *Nauchnoe Obozrenie*, 2017, no 22, pp. 37–42 (in Russian).
19. **Tolstosheev A. K.** Theory of mechanism construction: educational manual, Bryansk, Publishing house of BGUTU, 2001, 139 p. (in Russian).
20. **Pashkevich A., Wenger P., Chablat D.** *Mechanism and Machine Theory*, 2005, vol. 40, no 8, pp. 907–930.