
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 531.8, 621.01

**К ВОПРОСУ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ
СФЕРИЧЕСКИХ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ
С ЛИНЕЙНЫМИ ПРИВОДАМИ****© 2025 г. П. А. Ларюшкин^{1, *}, А. А. Хрестина²,
Ю. В. Сеницына¹, А. В. Семенов¹**¹ *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия*² *Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, Москва, Россия
e-mail: pav.and.lar@bmstu.ru

Поступила в редакцию 10.10.2024 г.

После доработки 15.11.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

В статье рассматривается вопрос структурного синтеза кинематических цепей сферических механизмов параллельной структуры с линейными приводами. Для анализа подвижности цепей используется винтовое исчисление. Последовательно исследуются возможные структуры цепей, включающие три и четыре пассивных вращательных кинематических пары. Показано, что при наличии в цепи трех вращательных пар синтез сферического механизма с линейными приводами невозможен, а использование для этой цели цепей с четырьмя вращательными парами возможно при наличии в цепи плоской диады, включающей приводную призматическую пару и две вращательные пары.

Ключевые слова: механизмы параллельной структуры, сферические механизмы, структурный синтез, винтовое исчисление, кинематическая цепь

DOI: 10.31857/S0235711925020012, **EDN:** DILRRY

В настоящее время механизмы параллельной структуры применяются в различных отраслях техники и производства, начиная от высокоскоростной сортировки небольших объектов в составе автоматизированных конвейерных линий и заканчивая позиционированием многотонных антенн и тарелок телескопов. В последнем случае, а также для других схожих операций, связанных с изменением ориентации различных объектов, часто используются сферические механизмы, выходное звено которых имеет только вращательные степени свободы и перемещается по поверхности условной сферы вокруг некоторого неподвижного центра вращения [1–3]. Подобные механизмы также довольно часто используются в медицине, в частности в устройствах для реабилитации восстановления функций конечностей [4–6].

Одним из самых известных в академической среде сферических механизмов является робот AgileEye, разработанный коллективом под руководством К. Госслена [7]. Механизм имеет три кинематических цепи, каждая из которых включает по три вращательных кинематических пары, оси которых пересекаются в одной точке — центре вращения. Данный механизм предназначен для высокоскоростной ориентации оптических приборов и устройств. Авторами заявлена угловая скорость более $1000^\circ/\text{с}$ и угловые ускорения более $20\,000^\circ/\text{с}^2$ при максимальных углах наклона

до 70°. Также заслуживают внимания такие устройства, как Vertical Motion Simulator, разработанный NASA в качестве тренажера для подготовки астронавтов к космическим полетам и пилотов вертолетов, а также созданный М. Росхаймом механизм OmniWrist [8], имеющий только две вращательных степени свободы, но позволяющий реализовывать наклон выходного звена на более чем 90°. Стоит также выделить разработанный Ю. Ву и М. Карригато метод синтеза механизмов, который позволил создать гибридный сферический механизм, позволяющий реализовывать движения, недоступные классическим параллельным механизмам [9, 10].

Отдельного упоминания заслуживают сферические механизмы с круговой направляющей, использование которой дает возможность полного оборота всего механизма вокруг оси, перпендикулярной плоскости направляющей. Так, группой ученых ИМАШ РАН и МГТУ им. Н. Э. Баумана было разработано семейство подобных механизмов [11, 12], характерной чертой которых является возможность изменения вертикального положения центра вращения за счет использования дополнительной центральной цепи, кинематически развязанной с цепями, отвечающими за сферическое движение.

Большинство сферических механизмов параллельной структуры реализовано с использованием вращательных приводов с редукторами. Так, из упомянутых выше механизмов исключением является только OmniWrist, причем линейные приводы в данном устройстве присоединены к кинематическим цепям сбоку, т.е. с точки зрения кинематической структуры не являются неотъемлемыми составными частями цепей. Использование вращательных приводов с редукторами имеет ряд недостатков, в частности наличие люфтов, которое особенно явно проявляется если привод работает в условиях значительного изменения температуры. В этом случае выбрать зазоры в передаче можно для какого-то определенного диапазона температур и при выходе за его пределы возможно возникновение люфтов, либо заклинивание передачи. Данный факт делает целесообразным разработку сферических механизмов с линейными приводами, использование которых может оказаться более удобным. Настоящая статья посвящена структурному синтезу подобных механизмов, а именно поиску возможных вариантов структуры их кинематических цепей. Структурный синтез и анализ подвижности указанных цепей проводится с использованием винтового исчисления.

Условия задачи синтеза кинематических цепей сферического механизма с линейными приводами. Решение задачи синтеза сферического механизма параллельной структуры с тремя степенями свободы и линейными приводами начнем с синтеза одной отдельной кинематической цепи. Поскольку любую двух- и более подвижную кинематическую пару можно теоретически представить в виде комбинации одноподвижных кинематических пар, будем считать, что синтезируемая цепь имеет только одноподвижные пары, причем данные пары расположены между основанием и выходным звеном последовательно.

Поскольку по условиям поставленной задачи требуется наличие линейного привода, синтезируемая кинематическая цепь должна включать как минимум одну призматическую кинематическую пару. Помимо этого, для обеспечения сферического движения выходного звена данная цепь должна включать как минимум три вращательных кинематических пары. Также обязательным условием будет являться то, что для любого положения выходного звена должно быть невозможным за счет параллельного переноса совместить любые две оси вращательных пар или разместить все три оси в одной плоскости. В противном случае выходное звено будет иметь меньше трех вращательных степеней свободы. Таким образом, минимальное количество одноподвижных кинематических пар в цепи будет равно четырем.

Кинематические цепи с тремя вращательными и одной призматической парами. Существует четыре варианта структуры кинематической цепи с тремя вращательными

и одной призматической парами: $\underline{P}RRR$, $R\underline{P}RR$, $RR\underline{P}R$ и $RRR\underline{P}$, где R обозначает вращательную пару, P — призматическую, а подчеркивание указывает на то, что пара является приводной. Здесь и далее порядок последовательного расположения пар — от основания к выходному звену (рис. 1).

Сопоставим кинематическим парам единичные кинематические винты: вращательным парам R_1 , R_2 и R_3 — винты нулевого параметра t_{R_1} , t_{R_2} , t_{R_3} , а призматической паре P — винт бесконечного параметра t_p . При этом в качестве примера рассмотрим цепь $\underline{P}RRR$ (рис. 2).

Важно заметить, кинематические винты показаны только для цепи $\underline{P}RRR$ в целях упрощения изложения, поскольку для всех других вариантов указанные винты будут такими же. Соответственно, все последующие рассуждения справедливы для всех

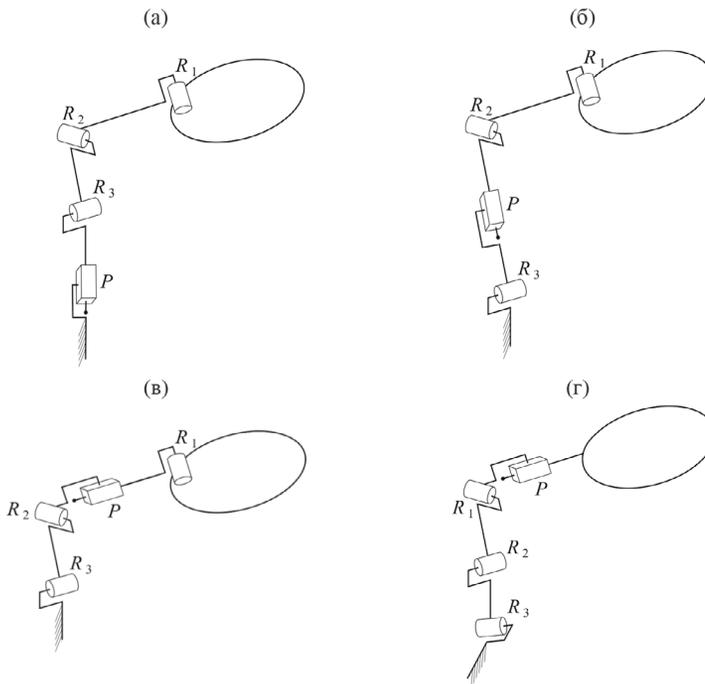


Рис. 1. Варианты кинематических цепей с тремя вращательными и одной призматической парами: $\underline{P}RRR$ (а), $R\underline{P}RR$ (б), $RR\underline{P}R$ (в), $RRR\underline{P}$ (г).

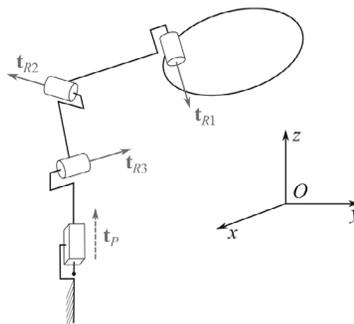


Рис. 2. Кинематические винты цепи с тремя вращательными и одной призматической парами на примере цепи $\underline{P}RRR$.

четырёх возможных вариантов кинематической цепи с тремя вращательными и одной призматической парами.

При приведении винтов в центр вращения, являющийся одновременно началом неподвижной системы координат $Oxyz$, их координаты в общем случае будут записываться следующим образом:

$$\mathbf{t}_{R1} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_{R1} \\ \boldsymbol{\rho}_{R1} \times \mathbf{s}_{R1} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_{R2} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_{R2} \\ \boldsymbol{\rho}_{R2} \times \mathbf{s}_{R2} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_{R3} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_{R3} \\ \boldsymbol{\rho}_{R3} \times \mathbf{s}_{R3} \end{bmatrix}, \mathbf{t}_P = \begin{bmatrix} [0 \ 0 \ 0]^T \\ \hat{\mathbf{s}}_P \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\hat{\mathbf{s}}$ — единичный вектор, задающий направление оси кинематической пары; $\boldsymbol{\rho}$ — вектор из точки O до любой точки на оси кинематической пары, а индексы показывают к какой именно кинематической паре относится соответствующий вектор или винт. Здесь и далее все векторы и винты по умолчанию записываются в виде столбцов.

Если механизм является работоспособным, то некоторый произвольный (в рамках имеющихся степеней свободы) кинематический винт выходного звена $\boldsymbol{\Omega}$ можно получить линейной комбинацией кинематических винтов цепи

$$\dot{q}_{R1}\mathbf{t}_{R1} + \dot{q}_{R2}\mathbf{t}_{R2} + \dot{q}_{R3}\mathbf{t}_{R3} + \dot{q}_P\mathbf{t}_P = \boldsymbol{\Omega}, \quad (2)$$

где \dot{q} — скорость в соответствующей (согласно индексу) кинематической паре. При этом данное утверждение должно быть справедливо для всех кинематических цепей.

Поскольку синтезируемый механизм должен иметь только вращательные степени свободы, моментная часть (последние три координаты) винта $\boldsymbol{\Omega}$ всегда будет нулевой. Тогда, с учетом того, что векторная часть (первые три координаты) винта \mathbf{t}_P является нулевой, выражение (2) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} \dot{q}_{R1}\hat{\mathbf{s}}_{R1} + \dot{q}_{R2}\hat{\mathbf{s}}_{R2} + \dot{q}_{R3}\hat{\mathbf{s}}_{R3} = \boldsymbol{\omega}, \\ \dot{q}_{R1}\boldsymbol{\rho}_{R1} \times \hat{\mathbf{s}}_{R1} + \dot{q}_{R2}\boldsymbol{\rho}_{R2} \times \hat{\mathbf{s}}_{R2} + \dot{q}_{R3}\boldsymbol{\rho}_{R3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R3} + \dot{q}_P\hat{\mathbf{s}}_P = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\omega}$ — векторная часть винта $\boldsymbol{\Omega}$, представляющая собой мгновенную угловую скорость выходного звена.

Верхняя строка выражения (3) представляет собой систему из трех линейных уравнений с тремя неизвестными: \dot{q}_{R1} , \dot{q}_{R2} , \dot{q}_{R3} . Таким образом, значения скоростей во вращательных парах рассматриваемой кинематической цепи зависят только от вектора угловой скорости выходного звена $\boldsymbol{\omega}$ и однозначно определяются им. В то же время нижнюю строку выражения (3) можно переписать следующим образом:

$$\dot{q}_{R1}\boldsymbol{\rho}_{R1} \times \hat{\mathbf{s}}_{R1} + \dot{q}_{R2}\boldsymbol{\rho}_{R2} \times \hat{\mathbf{s}}_{R2} + \dot{q}_{R3}\boldsymbol{\rho}_{R3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R3} = -\dot{q}_P\hat{\mathbf{s}}_P. \quad (4)$$

Согласно (1), если в общем случае оси вращательных кинематических пар не проходят через центр вращения, то соответствующие кинематические винты имеют ненулевую моментную часть. Поскольку значения скоростей в активных парах однозначно определяются вектором $\boldsymbol{\omega}$, изменяя длину и направление данного вектора можно получить любые значения \dot{q}_{R1} , \dot{q}_{R2} и \dot{q}_{R3} . Тогда сумма в левой части уравнения (4) в общем случае также может представлять собой вектор любого направления. Однако уравнение (4) может обращаться в тождество только в том случае, если данный вектор коллинеарен вектору $\hat{\mathbf{s}}_P$, а значит, кинематическая цепь, в которой

оси вращательных пар не пересекаются, не может обеспечить только сферическое движение выходного звена без его линейного перемещения.

Если ось одной из вращательных пар будет проходить через точку O , то кинематическая цепь также не сможет обеспечить чисто сферическое движение выходного звена. Так, например, если ось пары R_1 проходит через точку O , то выражение (4) приобретает следующий вид:

$$\dot{q}_{R_2} \mathbf{p}_{R_2} \times \hat{\mathbf{s}}_{R_2} + \dot{q}_{R_3} \mathbf{p}_{R_3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R_3} = -\dot{q}_P \hat{\mathbf{s}}_P.$$

Очевидно, что в этом случае левая часть уравнения может представлять собой любой вектор, принадлежащий плоскости, задаваемой векторами $\mathbf{p}_{R_2} \times \hat{\mathbf{s}}_{R_2}$ и $\mathbf{p}_{R_3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R_3}$, и неколлинеарный в общем случае вектору $\hat{\mathbf{s}}_P$.

Далее предположим, что оси двух вращательных пар, например R_1 и R_2 , проходят через точку O . Тогда

$$\dot{q}_{R_3} \mathbf{p}_{R_3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R_3} = -\dot{q}_P \hat{\mathbf{s}}_P.$$

Кинематическая цепь теоретически сможет обеспечить чистое сферическое движение выходного звена в том случае, если ось призматической пары перпендикулярна плоскости, задаваемой векторами \mathbf{p}_{R_3} и $\hat{\mathbf{s}}_{R_3}$, т.е. плоскости, проходящей через ось пары R_3 и точку O . Однако на практике обеспечить выполнение этого условия конструктивно невозможно ввиду того, что относительное положение указанной плоскости и оси призматической пары будет меняться в зависимости от ориентации выходного звена.

Наконец, если оси всех трех вращательных пар проходят через точку O , то из уравнения (4) следует, что скорость в призматической должна всегда быть равной нулю, что невозможно, т.к. данная пара должна быть приводной по условию поставленной задачи.

Таким образом, использование кинематических цепей с приводной призматической парой и тремя пассивными вращательными парами для синтеза трехподвижного сферического механизма невозможно.

Кинематические цепи с четырьмя вращательными и одной призматической парами.

Перейдем к рассмотрению кинематических цепей, в которых помимо приводной призматической пары имеется четыре вращательных пары (рис. 3).

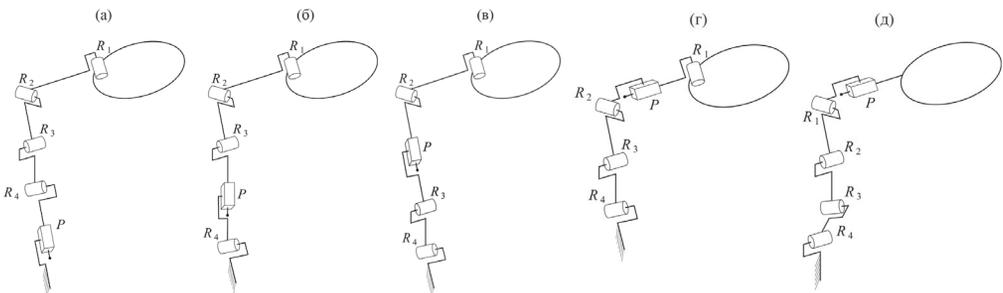


Рис. 3. Варианты кинематических цепей с четырьмя вращательными и одной призматической парами: PRRRR (а), RPRRR (б), RRPRR (в), RRRPR (г), RRRRP (д).

Как и ранее, рассмотрим единичные кинематические винты на примере одной из цепей, а именно PRRRR (рис. 4), принимая во внимание, что дальнейшие рассуждения будут справедливы для всех пяти возможных вариантов структуры.

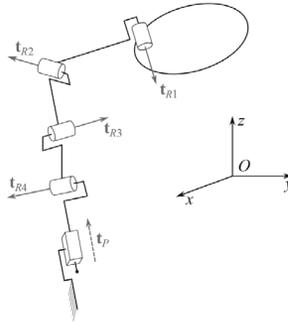


Рис. 4. Кинематические винты цепи с четырьмя вращательными и одной призматической парами на примере цепи \underline{PRRRR} .

Координаты винтов \mathbf{t}_{R1} , \mathbf{t}_{R2} , \mathbf{t}_{R3} , \mathbf{t}_P в общем случае будут иметь вид, соответствующий выражению (1), а координаты винта \mathbf{t}_{R4} будут следующими:

$$\mathbf{t}_{R4} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{s}}_{R4} \\ \boldsymbol{\rho}_{R4} \times \hat{\mathbf{s}}_{R4} \end{bmatrix}.$$

Выражение (4) для подобной цепи будет иметь следующий вид:

$$\dot{q}_{R1} \boldsymbol{\rho}_{R1} \times \hat{\mathbf{s}}_{R1} + \dot{q}_{R2} \boldsymbol{\rho}_{R2} \times \hat{\mathbf{s}}_{R2} + \dot{q}_{R3} \boldsymbol{\rho}_{R3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R3} + \dot{q}_{R4} \boldsymbol{\rho}_{R4} \times \hat{\mathbf{s}}_{R4} = -\dot{q}_P \hat{\mathbf{s}}_P. \quad (5)$$

Легко видеть, что, как и в случае с ранее рассмотренными цепями с тремя вращательными кинематическими парами, если через точку O не проходит ни одной оси вращательных пар, либо проходит ось только одной такой пары, то уравнение (5) в общем случае не может быть обращено в тождество. Иными словами, оси как минимум двух вращательных пар должны проходить через точку O . Пусть такими парами являются R_1 и R_2 . Тогда выражение (5) примет следующий вид:

$$\dot{q}_{R3} \boldsymbol{\rho}_{R3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R3} + \dot{q}_{R4} \boldsymbol{\rho}_{R4} \times \hat{\mathbf{s}}_{R4} = -\dot{q}_P \hat{\mathbf{s}}_P. \quad (6)$$

Если оси пар R_1 , R_2 и R_3 удовлетворяют обозначенному ранее условию невозможности за счет параллельного переноса совместить любые две оси или разместить все три оси в одной плоскости, выбор направления оси пары R_4 не будет ограничен данным условием. Предположим, что оси пар R_3 и R_4 параллельны. Тогда $\hat{\mathbf{s}}_{R3} = \hat{\mathbf{s}}_{R4}$, а выражение, аналогичное выражению (3), будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{q}_{R1} \hat{\mathbf{s}}_{R1} + \dot{q}_{R2} \hat{\mathbf{s}}_{R2} + (\dot{q}_{R3} + \dot{q}_{R4}) \hat{\mathbf{s}}_{R3} = \boldsymbol{\omega}. \\ \dot{q}_{R3} \boldsymbol{\rho}_{R3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R3} + \dot{q}_{R4} \boldsymbol{\rho}_{R4} \times \hat{\mathbf{s}}_{R3} = -\dot{q}_P \hat{\mathbf{s}}_P. \end{cases} \quad (7)$$

Из первой части выражения (7) следует, что вектор $\boldsymbol{\omega}$ однозначно определяет только значение суммы $\dot{q}_{R3} + \dot{q}_{R4}$, в то время как конкретные значения самих скоростей могут быть любыми. Тогда для любого $\boldsymbol{\omega}$ левая часть второго уравнения, входящего в (7), будет представлять собой не некоторый конкретный вектор, а плоскость, задаваемую векторами $\boldsymbol{\rho}_{R3} \times \hat{\mathbf{s}}_{R3}$ и $\boldsymbol{\rho}_{R4} \times \hat{\mathbf{s}}_{R3}$, т.е. перпендикулярную вектору $\hat{\mathbf{s}}_{R3}$ (рис. 5).

Тогда для рассматриваемого варианта кинематической цепи чистое сферическое движение выходного звена механизма можно обеспечить в том случае, если вектор $\hat{\mathbf{s}}_P$ всегда лежит в указанной плоскости. Иными словами, ось призматической

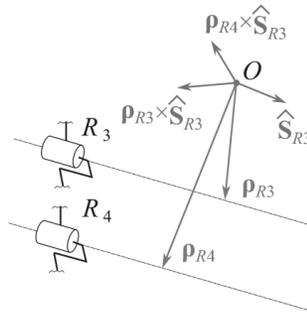


Рис. 5. Векторные и моментные части винтов t_{R_3} и t_{R_4} , приведенные в точку O при условии параллельности осей пар R_3 и R_4 .

пары всегда должна быть перпендикулярной (либо скрещиваться под прямым углом) осям вращательных пар R_3 и R_4 . На практике это условие может быть легко выполнено, если вращательные пары R_3 , R_4 и призматическая приводная пара образуют плоскую группу Ассур второго класса второго порядка второго вида \underline{PRR} (или, что то же самое, \underline{RRP}) или группу Ассур второго класса второго порядка третьего вида \underline{RPR} (рис. 6).

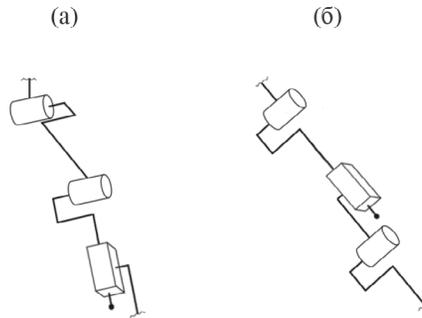


Рис. 6. Группы Ассур второго класса второго порядка: группа второго вида \underline{PRR} (а), группа третьего вида \underline{RPR} (б).

Если оси трех вращательных пар, например R_1 , R_2 , R_3 проходят через точку O , то уравнение (5) запишется следующим образом:

$$\dot{q}_{R4} \mathbf{p}_{R4} \times \hat{\mathbf{S}}_{R4} = -\dot{q}_P \hat{\mathbf{S}}_P.$$

Соответственно, данная цепь может реализовать сферическое движение выходного звена при условии перпендикулярности вектора $\hat{\mathbf{S}}_P$ плоскости, задаваемой осью пары R_4 и точкой O . Однако, как уже было указано ранее, на практике обеспечить выполнение данного условия для любой произвольной ориентации выходного звена не представляется возможным.

Наконец, если оси всех вращательных четырех пар проходят через точку O , то согласно (5) скорость в призматической паре всегда должна быть равна нулю и, соответственно, такая пара не может быть приводной, что противоречит условию поставленной задачи.

Таким образом, кинематическая цепь трехподвижного сферического механизма с линейным приводом должна включать как минимум пять одноподвижных кинематических пар: четыре вращательных и, собственно, одну приводную призматическую пару. При этом оси двух вращательных пар должны проходить через центр вращения, а две другие пары совместно с призматической должны формировать группу Ассур второго класса второго порядка второго или третьего вида. Дополнительно обозначая штрихом пары, оси которых пересекают точку O , а также выделяя скобками пары, формирующие плоскую диаду, все подходящие варианты структуры кинематической цепи можно записать следующим образом: $(R\underline{P}R)R'R'$, $R'(R\underline{P}R)R'$, $R'R'(R\underline{P}R)$, $(P\underline{R}R)R'R'$, $R'(P\underline{R}R)R'$, $R'R'(P\underline{R}R)$, $(R\underline{R}P)R'R'$, $R'(R\underline{R}P)R'$, $(R\underline{R}P)R'R'$. В качестве примера, на рис. 7 представлены варианты цепи с диадой $R\underline{P}R$.

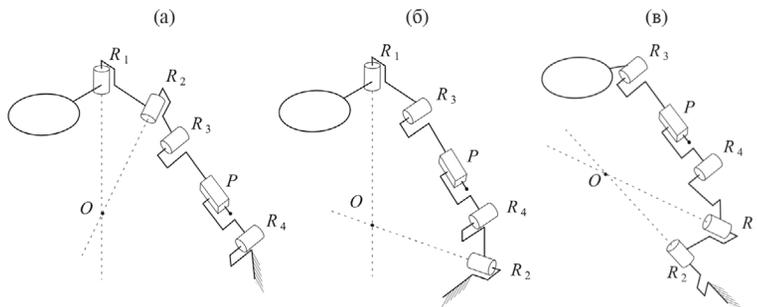


Рис. 7. Примеры подходящих вариантов кинематической цепи с диадой $R\underline{P}R$: $(R\underline{P}R)R'R'$ (а), $R'(R\underline{P}R)R'$ (б), $R'R'(R\underline{P}R)$ (в).

Заключение. В настоящей статье с применением винтового исчисления были проанализированы возможные варианты кинематических цепей, которые могли быть использованы для синтеза сферических механизмов параллельной структуры с тремя степенями свободы. При этом важным условием являлось наличие в цепи линейного привода, т.е. активной призматической пары. Как показал анализ, реализовать кинематическую цепь с тремя пассивными вращательными парами, удовлетворяющую данному условию, невозможно. Если же цепь содержит четыре вращательных пары, то указанное условие можно выполнить в том случае, если оси двух таких пар проходят через центр вращения, а оставшиеся две вращательных пары совместно с призматической парой образуют группу Ассур второго класса второго порядка второго или третьего вида.

Стоит отметить, что теоретически, линейный привод в любой цепи с условно активной вращательной парой можно реализовать за счет создания качающегося рычага, который, толкая кривошип, будет обеспечивать вращение указанной пары. Такой случай в настоящей статье не рассматривался, т.к. представляет собой, скорее, задачу разработки конструкции, а не структурного синтеза механизма.

В дальнейших исследованиях планируется определение и подробное изучение силовых винтов цепей в общем случае для отыскания структурных схем сферических механизмов с минимальными негативными эффектами, вызванными наличием особых положений.

Финансирование. Настоящая статья проводилась в рамках работы над диссертацией. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хейло С. В., Глазунов В. А., Палочкин С. В., Гарин О. А., Ключерев В. Н. Точность сферического механизма // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2019. № 1. С. 29.
2. Chaker A., Mlika A., Laribi M. A., Romdhane L., Zegloul S. Clearance and Manufacturing Errors' Effects on the Accuracy of the 3-RCC Spherical Parallel Manipulator // Eur. J. of Mechanics — A/Solids. 2013. № 37. P. 86.
3. Enferadi J., Shahi A. On the Position Analysis of a New Spherical Parallel Robot with Orientation Applications // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2016. № 37. P. 151.
4. Chaker A., Mlika A., Laribi M. A., Romdhane L., Zegloul S. Synthesis of Spherical Parallel Manipulator for Dexterous Medical Task // Frontiers of Mechanical Engineering. 2012. № 2 (7). P. 150.
5. Malosio M., Negri S. P., Pedrocchi N., Vicentini F., Caimmi M., Molinari Tosatti L. A Spherical Parallel Three Degrees-of-Freedom Robot for Ankle-Foot Neuro Rehabilitation // 2012 Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2012. P. 3356.
6. Vaida C., Plitea N., Carbone G., Birlescu I., Ulinici I., Pisla A., Pisla D. Innovative Development of a Spherical Parallel Robot for Upper Limb Rehabilitation // Int. J. of Mechanisms and Robotic Systems. 2018. № 4. P. 256.
7. Gosselin C., St-Pierre E., Gagne M. On the Development of the Agile Eye: Mechanical Design, Control Issues and Experimentation // IEEE Robotics and Automation Magazine. 1996. № 4 (3). P. 29.
8. Rosheim M. E., Sauter G. F. New High-Angulation Omni-Directional Sensor Mount // SPIE4821, Free-Space Laser Communication and Laser Imaging II. 2002. P. 163.
9. Wu Y., Carricato M. Symmetric Subspace Motion Generators // IEEE Transactions on Robotics. 2018. V. 34 (3). P. 716.
10. Wu Y., Carricato M. Design of a Novel 3-DoF Serial-Parallel Robotic Wrist: A Symmetric Space Approach // Robotics Research. Springer Proceedings in Advanced Robotics. 2018. V. 2. P. 389.
11. Laryushkin P. A., Zakharov M. N., Erastova K. G., Glazunov V. A. Spherical manipulator with parallel structure // Russian Engineering Research. 2017. № 37. P. 585.
12. Laryushkin P., Antonov A., Fomin A., Glazunov V. Novel Reconfigurable Spherical Parallel Mechanisms with a Circular Rail // Robotics. 2022. № 11 (2). Article 30.