

DOI: 10.12737/23481

*Рыбак Л.А., д-р техн. наук, проф.,
Гапоненко Е.В., канд. техн. наук, доц.,
Малышев Д.И., инженер-исследователь*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ВИНТОВ И ВИРТУАЛЬНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ*

rl_bgtu@intbel.ru

В данной статье рассмотрен метод структурного синтеза класса параллельных механизмов, обеспечивающих плоскопараллельное перемещение подвижной платформы. Рассмотренный метод основан на применении теории винтов и концепции виртуальных цепей. Получены структуры всех параллельных механизмов, содержащие три соединительные кинематические цепи.

Ключевые слова: *параллельный механизм, кинематическая цепь, теория винтов, виртуальная цепь.*

Введение. Параллельные механизмы (ПМ) – новое перспективное направление развития теории механизмов и машин. Такие механизмы обладают уникальными возможностями резкого, практически мгновенного изменения закона движения исполнительного звена под действием незначительного несилевого управляющего смещения одного из кинематических элементов без разрыва всей кинематической цепи. Это делает привлекательным применение таких механизмов, как в высокоточных станках, так и в тактильных и медицинских устройствах. В последнее время наблюдается значительное повышение интереса к проектированию и применению таких механизмов.

Вследствие большого количества разнообразных применений параллельных механизмов, траектория требуемых от них движений может существенно различаться. Существует насущная необходимость в поиске новых структур параллельных механизмов [1, 2], обрабатывающих заданную траекторию движения. Кроме того, новые структуры параллельных механизмов необходимы в связи с развитием станков с гибридной кинематикой, в которых два параллельных механизма работают совместно.

1. Траектории движения параллельных механизмов

Понятие траектории движения подвижной платформы содержит больше информации, чем число ее степеней свободы, и из-за потребности в параллельных механизмах с числом степеней свободы меньшим 6, структурному синтезу параллельных механизмов с заданной траекторией движения начиная с 1990-х гг. уделяется все большее внимание [3–10]. Существует мнение, что параллельные

механизмы с 6 степенями свободы применимы во всех случаях, и, соответственно, подвергается сомнению необходимость структурного синтеза параллельных механизмов с числом степеней свободы, меньшим 6. Одной из основных причин структурного синтеза параллельных механизмов с числом степеней свободы, меньшим 6, является уменьшение стоимости их изготовления. Другая причина заключается в том, что, в общем случае, уменьшение числа степеней свободы увеличивает диапазон допустимых перемещений по оставшимся степеням свободы.

Следует заметить, что к проблеме структурного синтеза параллельных механизмов с заданной траекторией движения обращался еще Хант [11] в 1973 г. В [11] ПМ использовались в качестве передаточных цепей, сохраняющих скорости перемещений. К сожалению, данная работа осталась практически незамеченной широкому кругу исследователей-робототехников, т. к. Хант не упомянул ее в своей пионерской работе по структурному синтезу параллельных механизмов [12]. Позднее несколько авторов независимо друг от друга работали над структурным синтезом плоскопараллельного механизма с 5 опорами [5, 8, 13] и некоторые результаты были получены повторно. Вклад [5, 8, 13] состоит в опровержении условия подвижности полного цикла, полученного в [11] алгебраически без подробных разъяснений. Таким образом, было неявно доказано существование параллельного механизма с 5 опорами, состоящими из вращательных и поступательных кинематических пар, совершающего плоскопараллельное перемещение, не связанное с работой [11].

До начала структурного синтеза ПМ необходимо описать движение, совершаемое его подвижной платформой. Иногда, например для поступательных или плоских ПМ, эта задача тривиальна. Однако, для других типов движения (например, для ПМ с 4 и 5 степенями свободы) описание перемещений подвижной платформы является гораздо более сложной задачей. Кроме того, характер движения подвижной платформы ПМ заданным числом степеней свободы может быть различен. Например, под движением с 3 степенями свободы может пониматься поступательное перемещение с тремя степенями свободы, сферическое движение с тремя степенями свободы, плоско-параллельное перемещение с тремя степенями свободы и т. д.

Траектория движения определяется как (возможно бесконечное) множество положений, которое описывает структуру движения подвижной платформы. Например, для поступательного ПМ траектория движения – множество поступательных перемещений твердого тела. Другим примером траектории движения может служить движение SCARA ПМ с 4 степенями свободы, состоящее из всех поступательных перемещений и вращения вокруг любой оси, имеющий заданное направление. Данная траектория движения также может быть описана посредством движения Шёнфлиса [14].

Следует заметить, что траектория движения не всегда может быть описана группой движений. Фактически, концепция траекторий движения может найти широкое применение, так как она более общая, чем концепция групп движений.

2. Концепция виртуальных цепей

Так как существующие методы описания траектории движения подвижной платформы в большинстве случаев неудобны, для описания траектории движения подвижной платформы будем использовать концепцию виртуальных цепей, подробно изложенную в [15]. Виртуальная цепь, связанная с данной траекторией движения – последовательная или параллельная КЦ, подвижная платформа которой осуществляет эту траекторию движения. Ясно, что для заданной траектории движения может существовать не единственная виртуальная цепь. Вообще, для данной траектории движения виртуальная цепь выбирается посредством всестороннего анализа группы силовых винтов последовательных и параллельных цепей с учетом изменения групп силовых винтов при изменении их положения. Кроме того, как правило выбирается простейшая виртуальная цепь. Далее будет показано, что

концепция виртуальных цепей является эффективным инструментом структурного синтеза ПМ.

В большинстве выполненных к настоящему времени работ, посвященных структурному синтезу ПМ, в качестве отправной точки используется число степеней свободы ПМ. Траектория движения используется для таких целей крайне редко. Подход к структурному синтезу, излагаемый далее, основан на указании траектории движения и числа избыточных (пассивных) связей D . Существует следующие предпосылки обоснованности такого подхода: 1- для многих приложений необходимы ПМ, обрабатывающие заданную траекторию движения. Траектория движения содержит в себе больше информации, чем число степеней свободы, и 2- число избыточных связей – важная величина, характеризующая механические свойства ПМ. Сложность, стоимость, и производительность ПМ, обрабатывающего заданную траекторию движения, меняются в очень широких пределах при изменении D . Для структурного синтеза ПМ, обрабатывающих заданную траекторию движения, будем использовать уравнения (2.24), (2.28) и (2.29) [15].

Рассмотрим класс параллельных механизмов [16], подвижная платформа которых совершает плоскопараллельное перемещение, т.е. линейное перемещение в некоторой плоскости и повороты относительно оси, перпендикулярной этой плоскости. В любом не особом положении группа силовых винтов параллельной кинематической цепи, соответствующей такому механизму, состоит из всех силовых винтов с бесконечным параметром ζ_∞ , расположенных в плоскости движения и всех силовых винтов с нулевым параметром ζ_0 , перпендикулярных этой плоскости, т.е. представляет собой $2 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$ -членную группу. Этой параллельной кинематической цепи можно поставить в соответствие виртуальную последовательную цепь, которую в дальнейшем будем обозначать E (рис. 1), а рассматриваемую кинематическую цепь обозначим, соответственно, $E = ПКЦ$.

При соединении основания и подвижной платформы $E = ПКЦ$ посредством виртуальной цепи E функционирование такой ПКЦ не меняется. Любая из ее опор и виртуальная цепь E образуют 3-подвижную одноконтурную кинематическую цепь. Если порядок группы силовых винтов опоры больше 0, то получаемая одноконтурная кинематическая цепь должна быть цепью с избыточными связями.

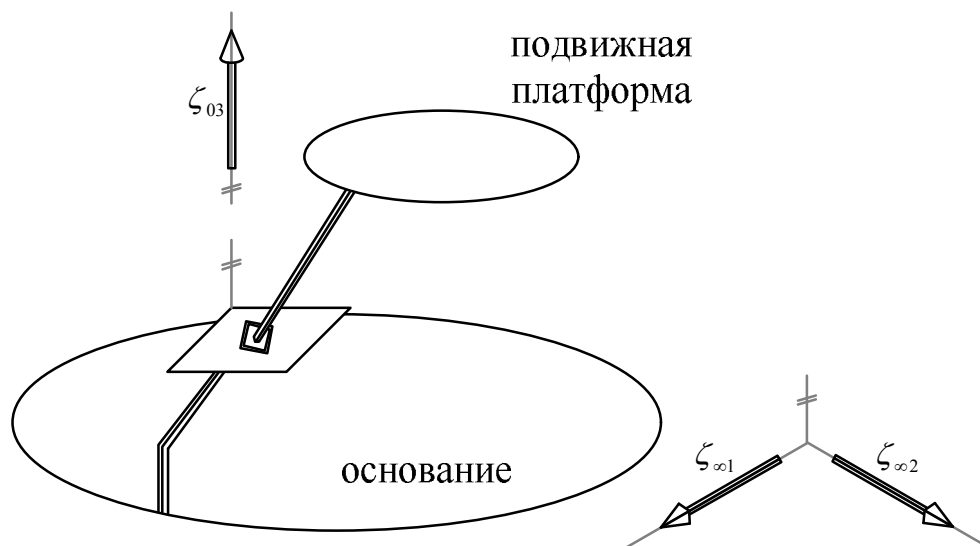


Рис. 1. Группа силовых винтов виртуальной цепи E

Исходя из этих соображений, осуществим структурный синтез рассматриваемого класса параллельных механизмов.

3. Декомпозиция группы силовых винтов 3-подвижной E= ПКЦ.

Так как группа силовых винтов параллельной кинематической цепи является линейной комбинацией групп силовых винтов всех ее опор, то группа силовых винтов любой опоры E= ПКЦ является подгруппой группы ее силовых винтов. Следовательно, группа силовых винтов опоры E= ПКЦ может быть 1-ζ₀-членной группой, 1-ζ∞-членной группой, 2-ζ∞-членной группой, 1-ζ∞-1-ζ₀-членной группой,

либо 2-ζ∞-1-ζ₀-членной группой. (рис. 2)

Комбинации подгрупп силовых винтов, образующих заданную группу силовых винтов могут быть определены из уравнения $\sum_m c^i = 6 + F + \Delta$,

где m – число групп силовых винтов, равное числу опор, для рассматриваемого случая 2 ≤ m ≤ 4, cⁱ – порядок подгруппы силовых винтов, 0 ≤ cⁱ ≤ c, c – порядок группы силовых винтов, в рассматриваемом случае c = 3, F – число степеней свободы параллельной кинематической цепи, F = 3, Δ – число избыточных связей.

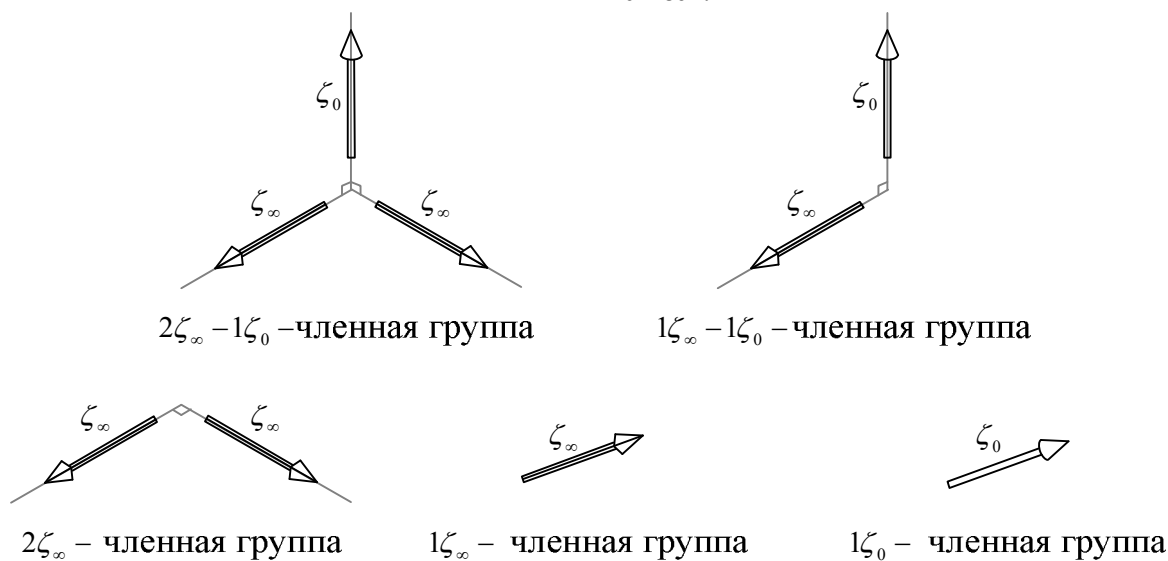


Рис. 2. Подгруппы 2-ζ∞-1-ζ₀-членной группы силовых винтов

Все решения этого уравнения для случая трех опор представлены в табл. 1.

Таблица 1

Комбинации групп силовых винтов опор для PPR= ПКЦ с 3 опорами

D	$2-z_{\infty} - 1-z_0$	$1-z_{\infty} - 1-z_0$	$2-z_{\infty}$	$1-z_0$	$2-z_{\infty}$	0-членная группа
6	3	0	0	0	0	0
5	2	1	0	0	0	0
	2	0	1	0	0	0
4	2	0	0	1	0	0
	2	0	0	0	1	0
	1	2	0	0	0	0
	1	1	1	0	0	0
	1	0	2	0	0	0
3	2	0	0	0	0	1
	1	1	0	1	0	0
	1	1	0	0	1	0
	1	0	1	0	0	0
	1	0	1	0	0	0
	0	2	1	0	0	0
	0	1	2	0	0	0
2	1	1	0	0	0	1
	1	0	1	0	0	1
	1	0	0	2	0	0
	1	0	0	1	1	0
	1	0	0	0	2	0
	0	2	0	1	0	0
	0	2	0	0	1	0
	0	1	1	1	0	0
	0	1	1	0	1	0
	0	0	2	1	0	0
1	1	0	0	1	0	1
	1	0	0	0	1	1
	0	2	0	0	0	1
	0	1	1	0	0	1
	0	0	2	0	0	1
	0	1	0	2	0	0
	0	1	0	1	1	0
	0	1	0	0	2	0
0	1	0	0	0	0	2
	0	1	0	1	0	1
	0	1	0	0	1	1
	0	0	1	1	0	1
	0	0	0	1	2	0
	0	0	0	2	1	0

4. Структурный синтез 3-подвижной КЦ, включающей виртуальную цепь E и имеющей заданную группу силовых винтов

Число кинематических пар f в одноконтурной кинематической цепи может быть определено по формуле $f = F + 6 - c$. Далее будут рассмотрены кинематические цепи, состоящие только из вращательных R и поступательных P кинематических пар первого порядка.

Из синтезированных опор следует отбросить те, в которых кинематические винты всех пар, кроме входящих в виртуальную цепь, линейно зависимы. Для этого необходимо и достаточно соблюдения следующих условий: 1– от-

сутствие соосных вращательных кинематических пар; 2– отсутствие поступательных кинематических пар, направления осей которых совпадают; 3– направление самое большее одной поступательной кинематической пары параллельно осям вращательных кинематических пар; 4– оси как максимум трех вращательных кинематических пар параллельны; 5– оси как максимум трех вращательных кинематических пар проходят через одну точку; 6– направления самое большее двух поступательных кинематических пар параллельны одной плоскости; 7– сумма числа вращательных кинематических пар, оси которых параллельны и числа поступательных кинематических пар не больше четырех; 8–

если направления n_p поступательных кинематических пар перпендикулярны осям n_R вращательных кинематических пар с параллельными осями, то $n_p + n_R \leq 3$.

Случай 2 – $\zeta_\infty - 1 - \zeta_0$ -членной группы.

В этом случае число кинематических пар равно шести. Такая кинематическая цепь состоит из 6 вращательных и/или поступательных кинематических пар, причем оси всех вращательных пар параллельны осям ζ_0 , а направления всех поступательных пар параллельны плоскости, перпендикулярной ζ_0 . После проверки условий линейной независимости винтов остается три кинематические цепи: $(RRRV)_E$, $(PRRV)_E$, $(PPRV)_E$, где $()_E$ – обозначение кинематической

цепи, все звенья которой перемещаются в параллельных плоскостях, V – виртуальная цепь E (рис. 3).

Случай 1 – $\zeta_\infty - 1 - \zeta_0$ -членной группы.

В этом случае число кинематических пар равно семи. Она формируется посредством сведения соосных вращательных кинематических пар в кинематическую цепь, совершающую плоскопараллельное перемещение, аналогичную рассмотренной ранее. Из условий линейной независимости видно, что количество соосных вращательных пар должно быть не больше двух. В результате получаем следующие одноконтурные кинематические цепи: $\tilde{R}(RRRV)_E$, $\tilde{R}(PRRV)_E$, $\tilde{R}(PPRV)_E$, где \tilde{R} – вращательная кинематическая пара, соосная некоторой другой паре кинематической цепи (рис. 4)

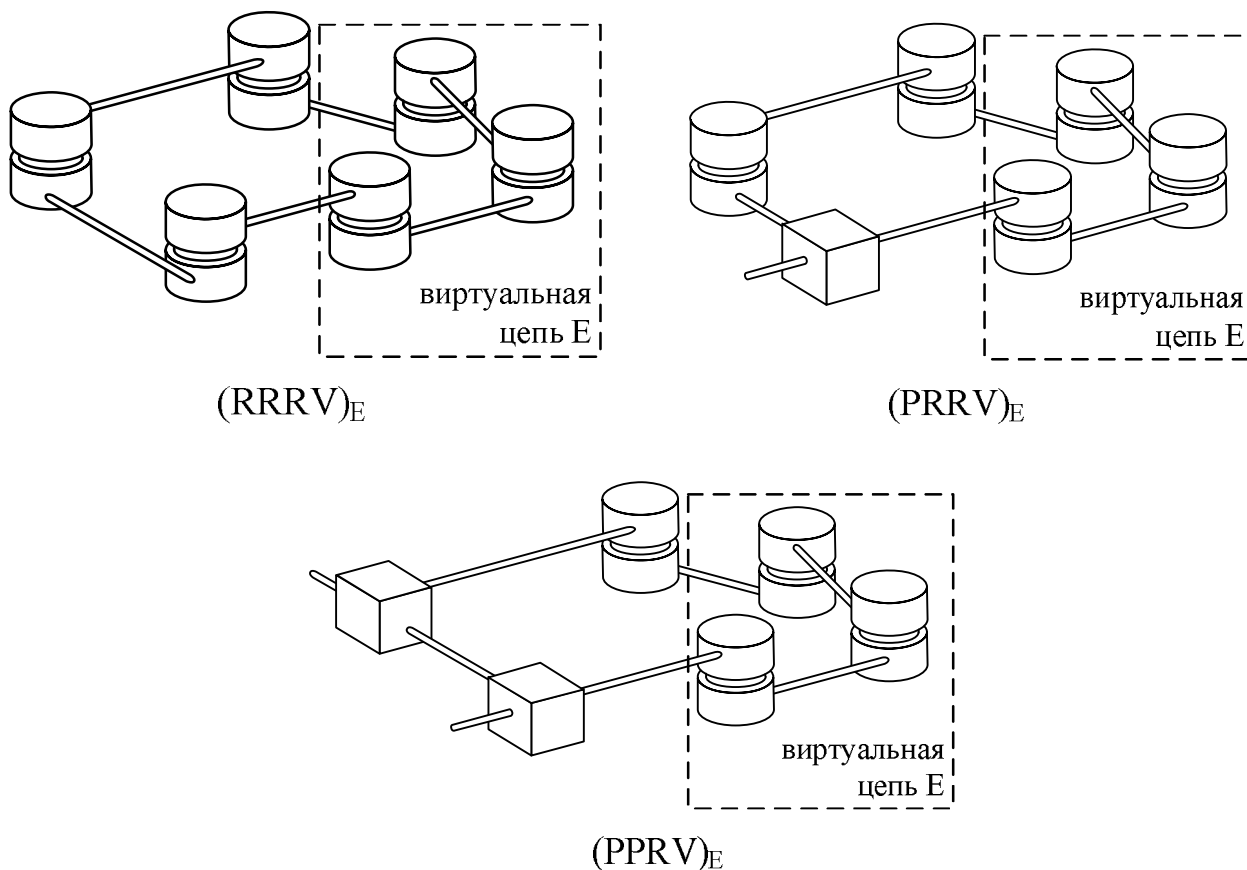


Рис. 3. Некоторые 3-подвижные одноконтурные КЦ, включающие виртуальную цепь E и имеющие $2 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$ -членную группу силовых винтов

Случай 2 – ζ_∞ -членной группы.

В этом случае число кинематических пар такое же, как и в предыдущем случае. Такая кинематическая цепь состоит из как минимум одной вращательной пары и как минимум из одной поступательной пары, где оси всех вращательных пар парал-

лельны и направления движения не всех поступательных пар перпендикулярны осям вращательных пар.

После проверки условий линейной независимости винтов остаётся 4 кинематические цепи: $P(RRRV)_E$, $P(PRRV)_E$, $P(PPRV)_E$ (рис. 3.5).

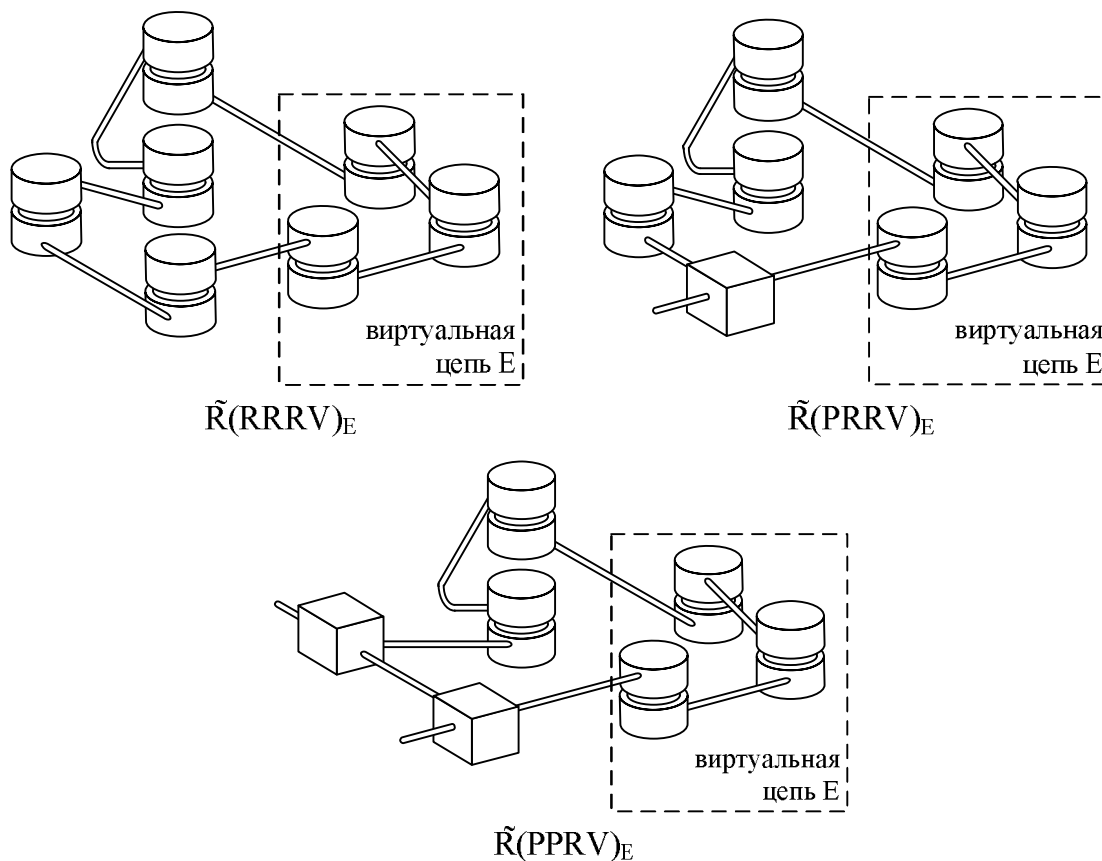


Рис. 4. Некоторые 3-подвижные одноконтурные КЦ, включающие виртуальную цепь E и имеющие $1 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$ -членную группу силовых винтов

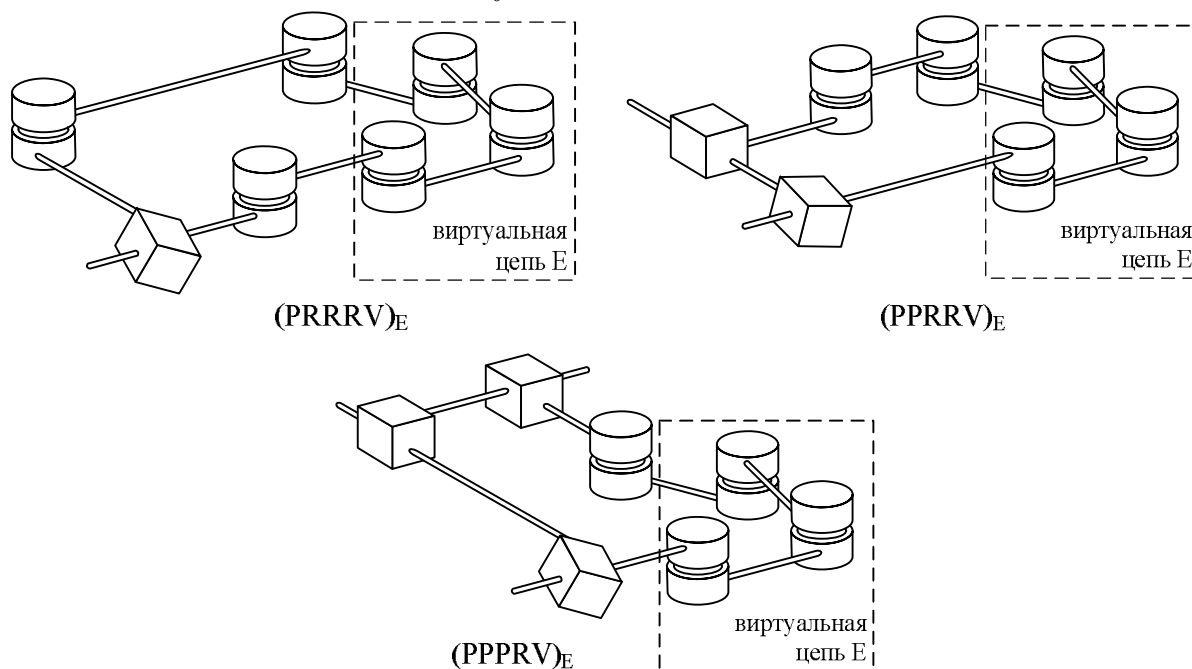


Рис. 5. Некоторые 3-подвижные одноконтурные КЦ, включающие виртуальную цепь E и имеющие $2 - \zeta_\infty$ -членную группу силовых винтов

Случай $1 - \zeta_\infty$ -членной группы. В этом случае число кинематических пар равно восьми. Получаем кинематическую цепь, которая состоит из совокупности как минимум одной вращательной пары и как минимум из одной поступа-

тельной пары (где оси всех вращательных пар параллельны и направления движения не всех поступательных пар перпендикулярны осям вращательных пар) и из одной или более вращательных, оси которых совпадают. Получаем

следующие кинематические цепи: PPPRV,

PPPR(RV)_E, PPR(RRV)_E, PPR(RRRV)_E (рис. 6).

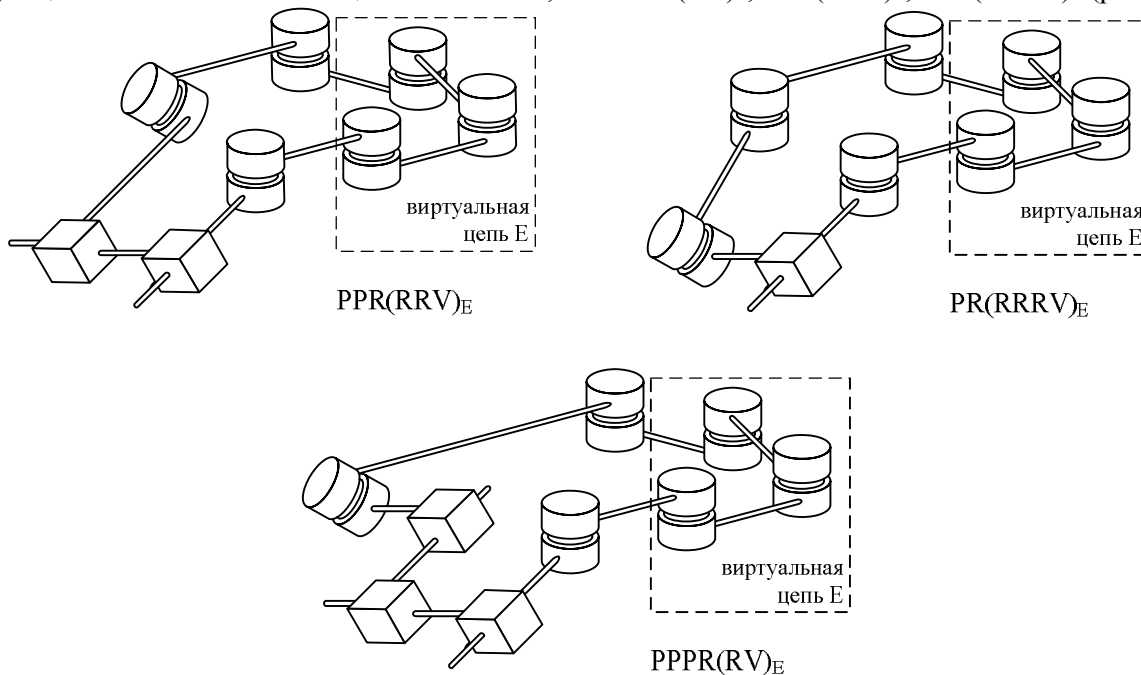


Рис. 6. Некоторые 3-подвижные одноконтурные КЦ, включающие виртуальную цепь E и имеющие $1 - \zeta_{\infty}$ -членную группу силовых винтов

Случай $1 - \zeta_0$ -членной группы. В этом случае число кинематических пар равно восьми. В этом случае существует два варианта структур кинематических цепей. Во-первых, кинематическая цепь, которая состоит из совокупности, по меньшей мере, из двух вращательных и/или поступательных кинематических пар (содержит как минимум одну вращательную пару и в которой все звенья перемещаются в параллельных плоскостях) и из двух или более вращательных кинематических пар, оси в которых пересекаются. Получаем следующие кинематические цепи: $(RR)_S(RRRV)_E$, $(RRR)_S(RRV)_E$, $(RR)_S(PRRV)_E$,

$(RRR)_S(PR\dot{V})_E$, где $(\)_S$ – совокупность вращательных кинематических пар, оси которых пересекаются в одной точке. Во-вторых, кинематическая цепь, которая состоит из совокупности, по меньшей мере, из двух вращательных и/или поступательных кинематических пар (содержит как минимум одну вращательную пару и в которой все звенья перемещаются в параллельных плоскостях) и из двух или более вращательных кинематических пар, оси в которых совпадают. Получаем только одну кинематическую цепь $(RRRRRRP)_E\dot{R}$ (рис. 7).

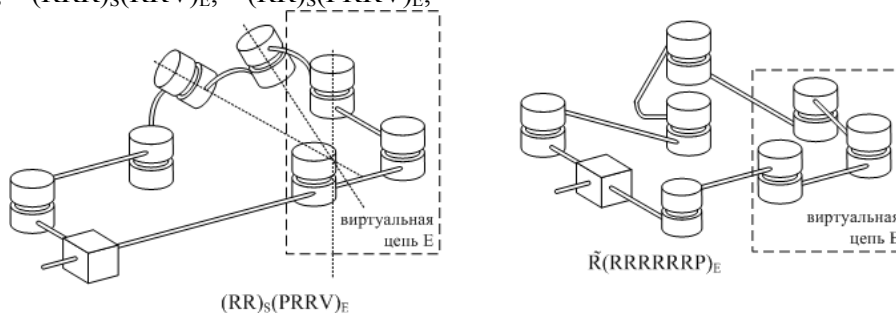


Рис. 7. Некоторые 3-подвижные одноконтурные КЦ, включающие виртуальную цепь E и имеющие $1 - \zeta_{\infty}$ -членную группу силовых винтов

Структуры опор могут быть получены из полученных ранее одноконтурных кинематических цепей посредством удаления виртуальной цепи E. Результаты приведены в таблице 2.

5. Сборка опор и выбор приводных кинематических пар

$E=ПКЦ$ может быть получена посредством сборки опор для $E=ПКЦ$, показанных в таблице 2, выбранных в соответствии с комбинациями групп силовых винтов опор из таблицы 1. При сборке $E=ПКЦ$ должно соблюдаться следующее

условие: линейная комбинация групп силовых винтов опор должна составлять $2 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$ -членную группу.

Таблица 2

Структуры опор

c^i	Класс	№	Структура
3	$2 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$		$(XXX)_E$
2	$1 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$	2	$\tilde{R}(XXX)_E$
		3	$(XXX)_E \tilde{R}$
	$2 - \zeta_\infty$	4	$(XXXX)_E$
1	$1 - \zeta_0$	5	$(RR)_S(RRR)_E$
		6	$(RRR)_S(RR)_E$
		7	$(RR)_S(PRR)_E$
		8	$(RRR)_S(PR)_E$
		9	$(RRRRRRP)_E \tilde{R}$
	$1 - \zeta_\infty$	0	PPPPR
		1	PPPR(R) _E
		2	PPR(RR) _E
		3	PPR(RRR) _E

Рассмотрим для примера E=ПКЦ семейства 3 (табл. 1). E=ПКЦ семейства 3 имеет две опоры с $1 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$ -членной группой и одну опору с $2 - \zeta_\infty$ -членной группой. Выберем требуемые

опоры. Собирая эти опоры получим E=ПКЦ семейства 3. Например, набор из двух опор $(XXX)_E \tilde{R}$ с членной группой и одной опоры $(XXXX)_E$ с членной группой даёт $2 - (XXX)_E \tilde{R} - (XXXX)_E$ E=ПКЦ (рис. 8). Как можно видеть из таблицы 1, из всех возможных комбинаций групп силовых винтов опор, только одна, состоящая из трех $2 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$, является комбинацией, в которой все группы силовых винтов имеют одинаковую структуру. В табл. 2 есть только одна опора с $2 - \zeta_\infty - 1 - \zeta_0$ -членной группой силовых винтов: $(XXX)_E$. Соответственно, существует лишь одно семейство E=ПКЦ, все опоры которых имеют одинаковую структуру – $3 - (XXX)_E$ (рис. 9).

Выбор приводных кинематических пар заключается в отыскании всех возможных комбинаций приводных кинематических пар и удалении тех из них, для которых не выполняются следующие условия: 1– приводные пары должны быть расположены на всех опорах настолько равномерно, насколько это возможно; 2– приводные пары желательно располагать на основании либо как можно ближе к нему; 3– не должно быть пассивных поступательных кинематических пар.

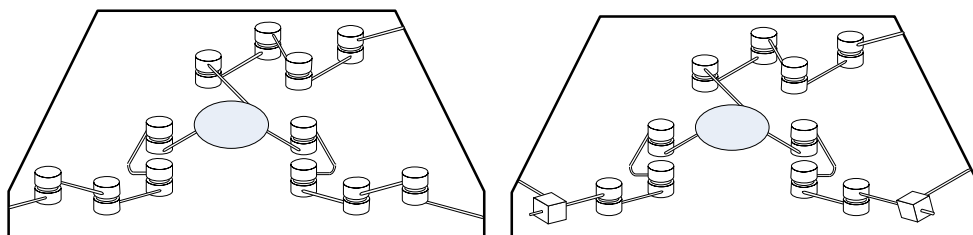


Рис. 8. Некоторые E=ПКЦ со структурой $2 - \tilde{R}(XXX)_E - (XXXX)_E$: $2 - (RRR)_E \tilde{R} - (RRRR)_E$ и $2 - (RRP)_E \tilde{R} - (RRRR)_E$

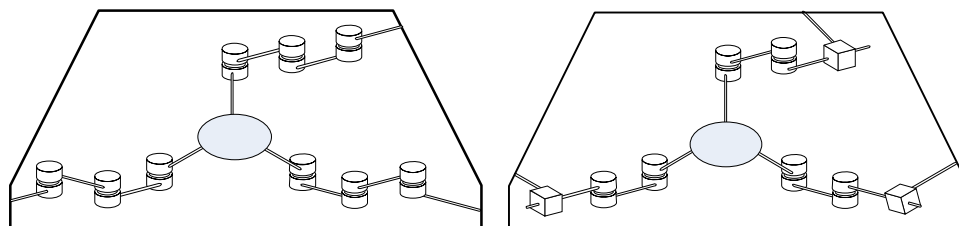


Рис. 9. Некоторые E=ПКЦ со структурой $3 - (XXX)_E$: $3 - (RRR)_E$ и $3 - (PRR)_E$

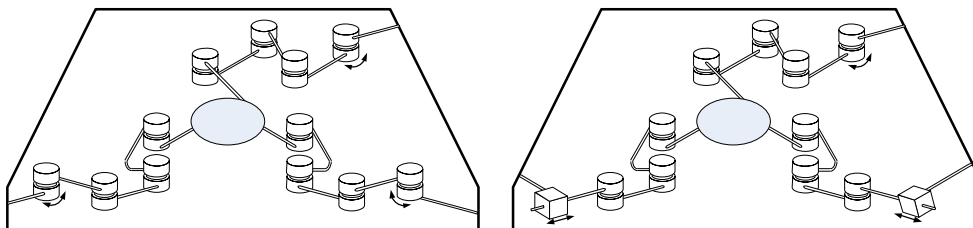
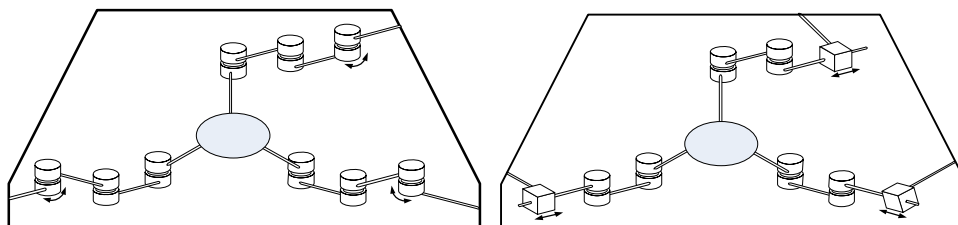


Рис. 10. Некоторые E=ПМ со структурой $2 - \tilde{R}(XXX)_E - (XXXX)_E$: $2 - (RRR)_E \tilde{R} - (RRRR)_E$ и $2 - (RRP)_E \tilde{R} - (RRRR)_E$

Рис. 11. Некоторые E=ПМ со структурой 3-(XXX)_E: 3-(RRR)_E и 3-(PRR)_E

Можно сформулировать следующее условие выбора приводных кинематических пар: для механизма с F степенями свободы набор из F приводных кинематических пар верен тогда и только тогда, когда в не особом положении приводные силовые винты всех приводных кинематических пар вместе с набором базисных винтов группы силовых винтов механизма образуют шестичленную группу. В частности, для рассмотренных выше механизмов, этим условиям удовлетворяют механизмы, изображенные на рисунках 10 и 11 (приводные кинематические пары обозначены стрелками).

**Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Соглашение № 16-19-00148.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Brogardh T. PKM research – important issues, as seen from a product development perspective at abb // Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, (Quebec, October 3–4 2002). P. 68–82.
2. Merlet J.-P. An initiative for the kinematics study of parallel manipulators // Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, (Quebec, October 3–4 2002). P. 2–9.
3. Angeles J. The qualitative synthesis of parallel manipulators / Proceedings of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, (Quebec, October 3–4 2002). P. 160–169.
4. Carricato M., Parenti-Castelli V. A family of 3-DOF translational parallel manipulators / Proceedings of the 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, (Pittsburgh, PA, 2001). P. DETC2001/DAC–21035.
5. Frisoli A., Checcacci D., Salsedo F., Bergamasco M. Synthesis By screw algebra of translating in-parallel actuated mechanisms // Advances in Robot Kinematics, (Kluwer Academic Publishers, 2000). P. 433–440.
6. Herve J. M. The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design // Mechanism and Machine Theory. 1999. 34(5). P. 719–730.
7. Huang Z., Li Q. C. General methodology for the type synthesis of lower-mobility symmetrical parallel manipulators and several novel manipulators // The International Journal of Robotics Research. 2002. 21(2). P. 131–145.
8. Kong X., Gosselin C.M. Generation of parallel manipulators with three translational degrees of freedom using screw theory // Proceedings of the CCToMM Symposium on Mechanisms, Machines and Mechatronics, (Montreal, Canada, 2001). P. M3–01–012.
9. Kong X., Gosselin C.M. Type synthesis of 3-DOF spherical parallel manipulators based on screw theory // ASME Journal of Mechanical Design. 2004. 126(1). P. 101–108.
10. Zlatanov D., Gosselin C.M. A new parallel architecture with four degrees of freedom // Proceedings of the 2nd Workshop on Computational Kinematics, (Seoul, Korea, 2001). P. 57–66.
11. Hunt K. H. Constant-velocity shaft couplings: a general theory // ASME Journal of Engineering for Industry. 1973. 95(2). P. 455.
12. Hunt K. H. Structural kinematics of in-parallel-actuated robot-arms // ASME Journal of Mechanical Design. 1983. 105(4). P. 705–712.
13. Carricato M., Parenti-Castelli V. A family of 3-DOF translational parallel manipulators // Proceedings of the 2001 ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, (Pittsburgh, PA, 2001). P. DETC2001/DAC–21035.
14. Hervé J.M., Sparacino F. Structural synthesis of parallel robots generating spatial translation / In Proceedings of the fifth International Conference on Advanced Robotics, (Pisa, Italy, 1991). P. 808–813.
15. X. Kong, C.M. Gosselin Type synthesis of parallel mechanisms // Springer Tracts in Advanced Robotics. (Heidelberg 2007). Vol. 33. P. 272.
16. Рыбак Л.А., Мамаев Ю.А., Малышев Д.И., Вирабян Л.Г. Программный модуль для реализации заданной траектории движения выходного звена робота-гексапода для 3D печати изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №8. С. 155–164.

Rybak L.A., Gaponenko E.V., Malyshev D.I.**STRUCTURAL SYNTHESIS OF PARALLEL MECHANISMS THAT PROVIDE PLANE-PARALLEL MOTION OF THE OUTPUT LINK BASED ON THE THEORY OF SCREWS AND VIRTUAL KINEMATIC CHAINS**

This article describes the method of structural synthesis of a class of parallel mechanisms that provide plane-parallel movement of the movable platform. The considered method is based on the theory of screws and the concept of virtual circuits. We obtain the structure of parallel mechanisms, containing three connecting kinematic chain.

Key words: *parallel mechanism, kinematic chain, the theory of screws, virtual circuit.*

Рыбак Лариса Александровна, доктор технических наук, профессор, кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: rl_bgtu@intbel.ru

Гапоненко Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент, кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: rl_bgtu@intbel.ru

Малышев Дмитрий Иванович, инженер-исследователь кафедры технологии машиностроения. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.
E-mail: rl_bgtu@intbel.ru