



## КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПЛАНЕТАРНЫХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ БЕЗ ЗАМКНУТЫХ КОНТУРОВ

Рассматриваются кинематические схемы планетарных коробок передач с двумя степенями свободы, выполненные по схеме 4+1 (четыре передачи переднего хода и одна передача заднего хода). Предлагаемые принципиальные решения характеризуются простыми конструкциями, относительно высокими КПД и отсутствием циркулирующих мощностей. Проекты ориентируются на применение совместно с блокируемым гидродинамическим трансформатором в автоматизированных трансмиссиях мобильных машин, для которых в первую очередь требуется упрощение управления машиной.

Мобильная машина, трансмиссия, планетарная коробка передач.

**Введение.** Решение практических задач автоматизации управления трансмиссиями автомобилей и других машин наземного транспорта во многих случаях осуществляется на основе планетарных коробок передач, поскольку планетарные механизмы обладают кинематическими и динамическими преимуществами по сравнению с передачами с неподвижными осями валов [1].

Планетарные коробки передач, в отличие от классических коробок передач непланетарного типа с неподвижными осями валов и со скользящими шестернями, позволяют сравнительно легко автоматизировать процесс переключения ступеней, что осуществляется с помощью системы переключаемых тормозов, останавливающих требуемые звенья планетарных механизмов, а также фрикционных сцепных муфт, изменяющих порядок соединения между собой звеньев планетарных механизмов. Кроме того, процесс изменения под нагрузкой передаточного отношения в планетарной коробке передач происходит более плавно, нежели в непланетарной коробке передач, благодаря подвижности в пространстве осей валов [2, 3].

**Краткие исторические сведения.** На ранних этапах своего развития в трансмиссиях мобильных машин применялись планетарные коробки передач с двумя степенями свободы, в которых переключение ступеней производится при включении одного из устройств управления. Первыми массовыми конструкциями планетарных коробок передач в первой четверти XX века стали разработки Генри Форда (Henry Ford) и Уолтера Вильсона (Walter Gordon Wilson) [4]. Планетарные коробки передач быстро получили широкое распространение и стали устанавливаться на легковые и грузовые автомобили, автобусы, тракторы, танки, железнодорожные машины [5]. Практически од-

новременно с появлением первых конструкций планетарных коробок передач начались разработки теории и устройств автоматического управления ими [6].

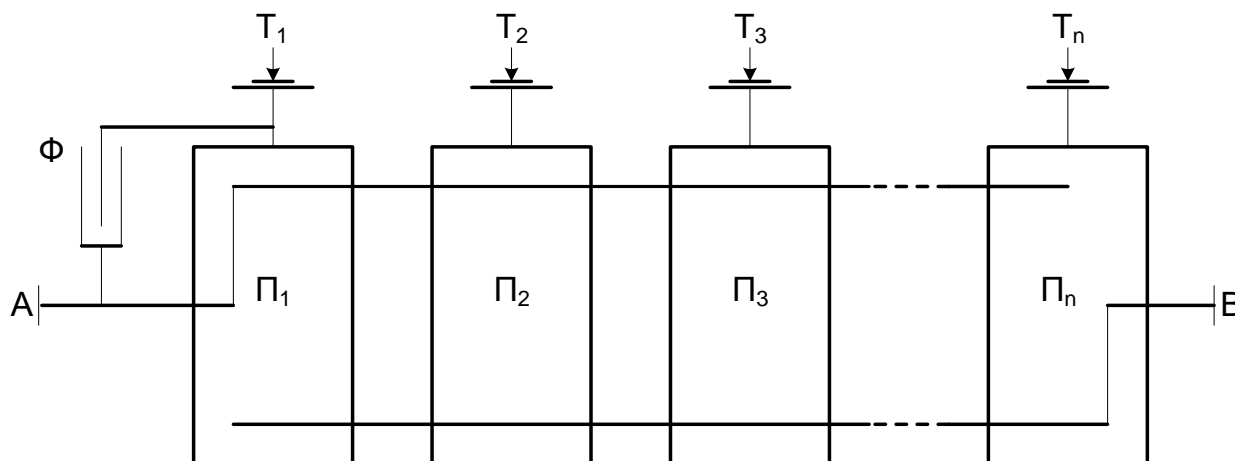
Одно из генеральных направлений развития автоматизированных трансмиссий мобильных машин связано с комбинированием планетарных коробок передач с гидродинамическими муфтами и трансформаторами. В 1925 г. немецкий инженер Герман Ризлер (Hermann Rieseler) сконструировал первую автомобильную гидромеханическую передачу (ГМП), в которой гидротрансформатор был соединен с планетарной коробкой передач [4]. Автоматизированные трансмиссии на основе гидротрансформатора и планетарной коробки передач с гидравлическим приводом устройств управления – фрикционных муфт и тормозов – быстро стали одним из трендов и практических стандартов в мировом транспортном машиностроении [1–3].

В более позднее время преимущественное распространение в трансмиссиях получили планетарные коробки передач с тремя степенями свободы, в которых переключение ступеней осуществляется при одновременном включении двух устройств управления. В последние 10–15 лет в автомобилестроении все чаще стали применяться планетарные коробки передач с четырьмя степенями свободы, в которых должны одновременно включаться три элемента управления [7].

**Анализ существующих разработок.** В специальной литературе приводятся сравнительные анализы свойств планетарных коробок передач с двумя, тремя и четырьмя степенями свободы [8, 9]. В таблице 1 приведен фрагмент результатов сравнения коробок передач по наименьшему числу элементов управления и планетарных механизмов [9].

**Сравнение планетарных коробок передач по наименьшему числу элементов управления  
и планетарных механизмов**

Число передач	Коробка передач с двумя степенями свободы		Коробка передач с тремя степенями свободы	
	число элементов управления	число планетарных механизмов	число элементов управления	число планетарных механизмов
2	2	1	3	1
3	3	2	3	2
4	4	3	4	2
5	5	4	4	2–3
...	...	...	...	...
10	10	9	6	3



*Рис. 1. Структурная схема планетарной коробки передач без замкнутых кинематических контуров*

При четырех и более ступенях рациональными оказываются коробки передач с тремя степенями свободы. В то же время общими недостатками планетарных коробок передач с тремя и более степенями свободы являются сложность конструкции, трудности расчета передаточных отношений, возникновение в некоторых случаях циркулирующей мощности, снижающей КПД трансмиссии, сложность гидравлической системы и алгоритмов управления, трудности с подводом рабочей жидкости через вращающиеся валы к фрикционным муфтам. Планетарные коробки передач с двумя степенями свободы характеризуются более простыми системами и алгоритмами управления, более простым подводом рабочей жидкости к тормозам, содержат единственную блокировочную муфту, но в заблокированном состоянии вращается большое число планетарных механизмов.

Синтез планетарной коробки передач с двумя степенями свободы может быть выполнен простым методом из отдельных простейших планетарных рядов с последовательным включением планетарного ряда в каждую ступень [10, 11]. Такие решения относятся к группе бесконтурных передач, поскольку они не содержат замкнутые кинематические контуры. На каждой передаче бесконтурной планетарной коробки работает только один планетарный механизм. Структурная схема планетарной коробки передач без замкнутых схем показана на рисунке 1, где А – входной (ведущий вал), В – выходной (ведомый) вал,  $P_i$  – планетарные меха-

низмы (планетарные ряды),  $T_i$  – тормоз,  $\Phi$  – муфта блокировки. Методика построения схемы бесконтурной коробки передач рассмотрена в [12].

При отсутствии в коробке передач замкнутых контуров отсутствует циркулирующая мощность на любой передаче, упрощается расчет передаточных чисел и значений КПД по передачам. Однако данный метод может быть рекомендован для образования коробок передач с числом ступеней не более четырех-пяти. К другим недостаткам бесконтурных схем можно отнести ограничение величин КПД на передачах значениями КПД планетарных рядов, повышение наложения полых (коаксиальных) валов при конструктивном оформлении коробки передач [13].

Одной из характерных тенденций в конструировании ГМП для мобильных машин с планетарными коробками передач является увеличение количества ступеней до 8–10 [7]. С другой стороны, анализ конструкций автомобильных ГМП с гидротрансформатором и планетарными коробками передач показывает, что еще достаточно широко эксплуатируются и продолжают применяться коробки передач, выполненные по схеме 4+1 – четыре передачи переднего хода и одна передача заднего хода. При этом высшая (четвертая) передача является повышающей, а примерные передаточные числа для таких коробок передач такие: первая передача – 2,85; вторая передача – 1,58; третья передача – 1,0; четвертая передача – 0,69; задний ход – 2,18 [14].

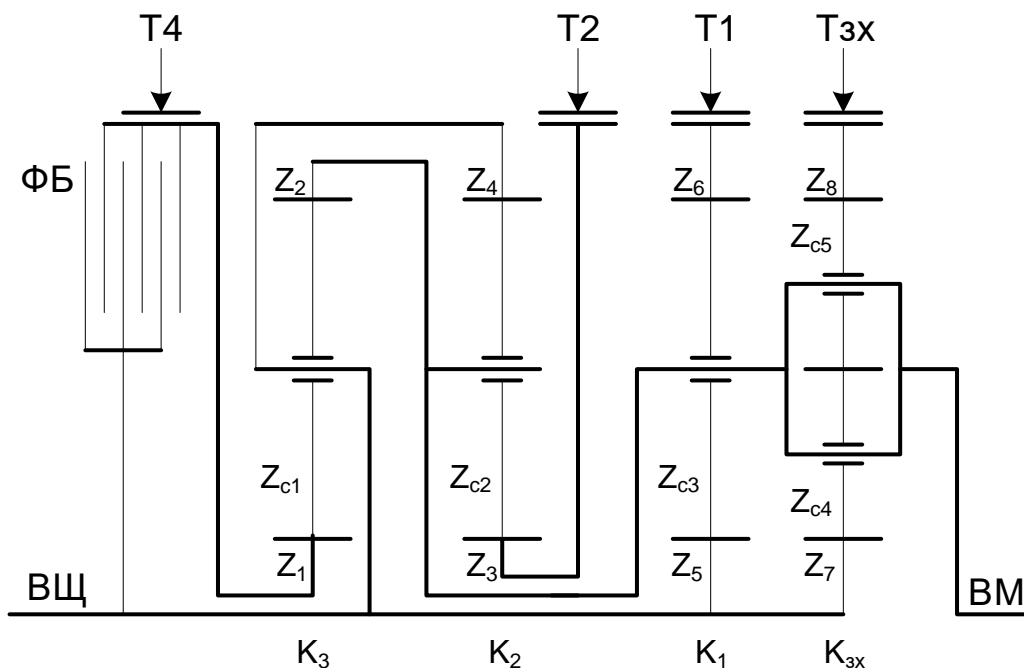


Рис. 2. Кинематическая схема планетарной коробки передач типа 4+1 с двумя степенями свободы

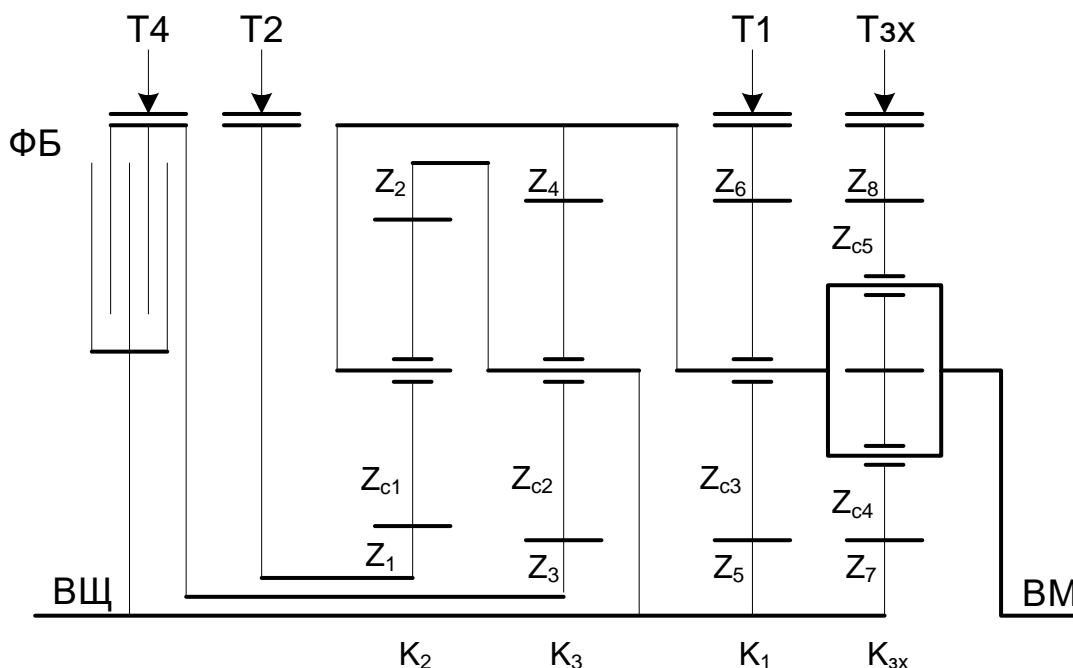


Рис. 3. Кинематическая схема планетарной коробки передач типа 4+1

**Результаты проектирования.** На рисунке 2 представлен один из вариантов кинематической схемы бесконтурной планетарной коробки передач с двумя степенями свободы типа 4+1.

На рисунке 3 приведен вариант кинематической схемы бесконтурной коробки передач типа 4+1 с другим порядком следования планетарных рядов  $K_2$  и  $K_3$ .

На приведенных схемах обозначены: ВЩ – ведущий (входной) вал; ВМ – ведомый (выходной) вал;  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K_{3x}$  – планетные механизмы (ряды) типа 2К-Н (по классификации В.Н. Кудрявцева) и соответствующие им внутренние передаточные отношения. Планетарные механизмы 2К-Н просты по конструкции, технологически

отработаны, имеют достаточно высокий внутренний КПД. Механизмы  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  содержат однозвонцовые сателлиты, механизм  $K_{3x}$  передачи заднего хода – двойные сателлиты. На схемах также обозначены:  $Z_1$ ,  $Z_3$ ,  $Z_5$ ,  $Z_7$  – солнечные шестерни;  $Z_2$ ,  $Z_4$ ,  $Z_6$ ,  $Z_8$  – эпициклические (коронные) шестерни;  $Z_{c1}$ ,  $Z_{c2}$ ,  $Z_{c3}$ ,  $Z_{c4}$ ,  $Z_{c5}$  – сателлиты.

Управление коробками передач осуществляется при помощи четырех тормозов  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_4$ ,  $T_{3x}$  и блокировочной муфты ФБ. Первая понижающая передача включается тормозом  $T_1$ , вторая понижающая передача – тормозом  $T_2$ , третья передача (прямая) – муфтой ФБ, четвертая передача (повышающая) – тормозом  $T_4$ , задний ход – тормозом  $T_{3x}$ .

На рисунке 4 представлена кинематическая схема планетарной коробки передач, в которой ступень заднего хода выполнена на механизме  $K_{3x}$  с одновенцовым сателлитом. При включении механизма  $K_{3x}$  он работает как непланетарная передача.

Рассмотренные коробки передач, выполненные по схеме 4+1, могут быть модифицированы по схеме 5+1

или 4+2 путем добавления пятого планетарного ряда для получения либо третьей понижающей передачи, либо второй передачи заднего хода. На рисунке 5 приведена кинематическая схема бесконтурной коробки передач типа 5+1 с двумя повышающими передачами. Тормоз  $T_5$  включает вторую повышающую (пятую) передачу.

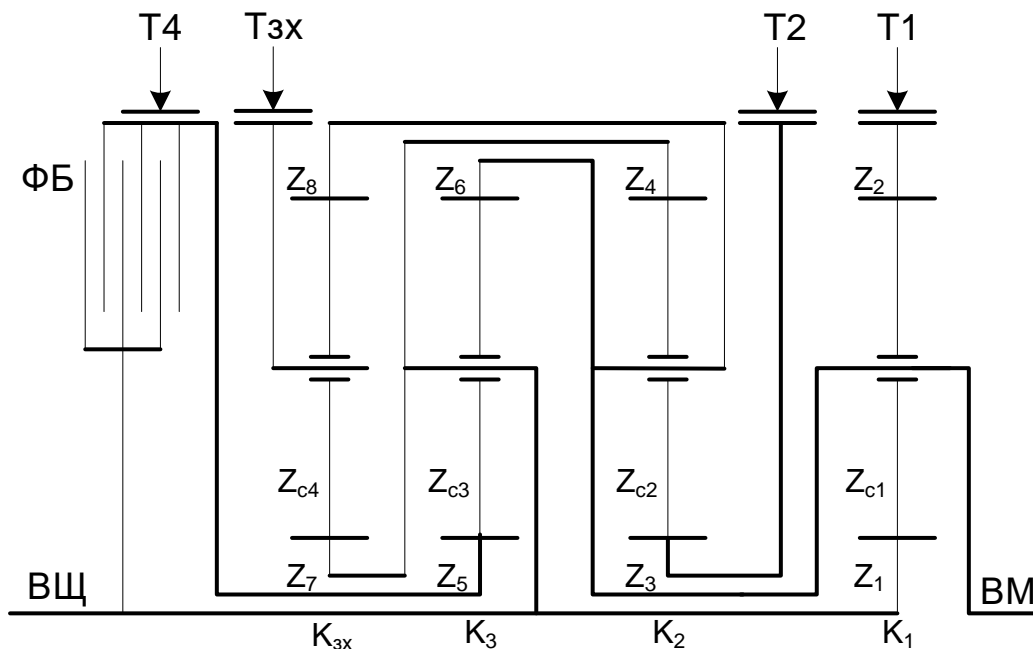


Рис. 4. Кинематическая схема планетарной коробки передач типа 4+1 с модифицированной ступенью заднего хода

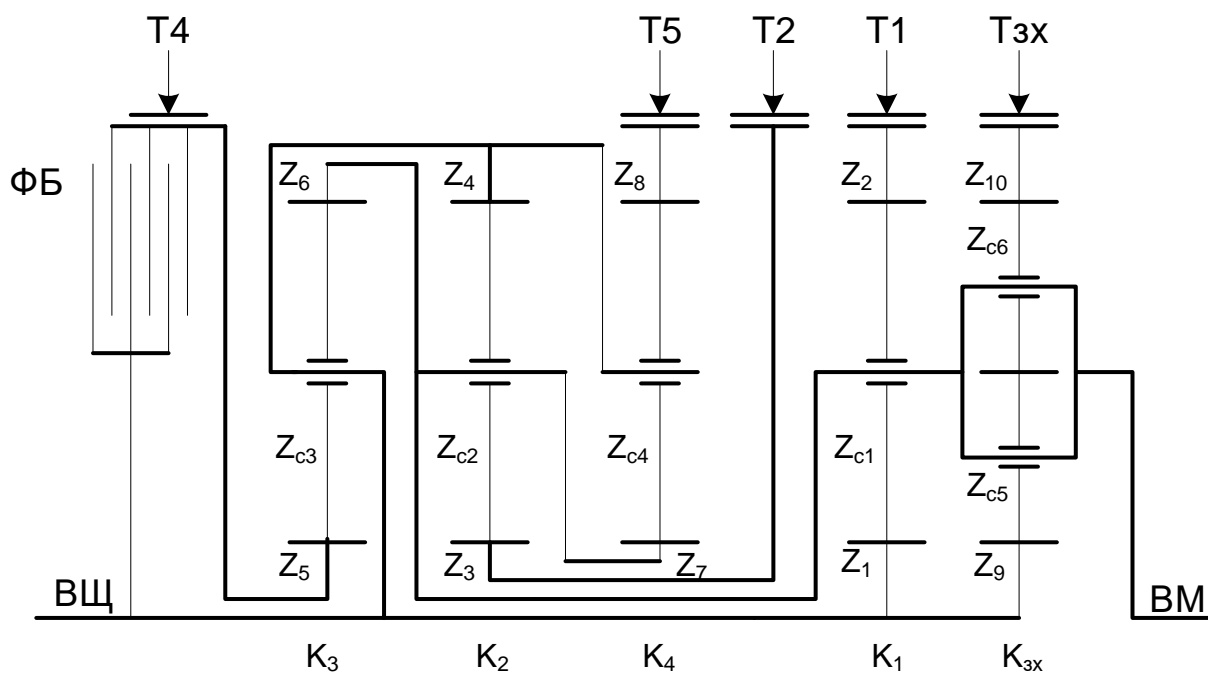


Рис. 5. Кинематическая схема планетарной коробки передач типа 5+1 с двумя повышающими ступенями

Варианты передаточных чисел коробок передач

Передаточное число ступени коробки передач $i$	Внутреннее передаточное отношение планетарного механизма			
	$K=-1,5$	$K=-2$	$K=-3$	$K=-4$
<b>Передачи переднего хода</b>				
Понижающая передача 1 ( $i = 1 - K$ )	2,5	3	4	5
Понижающая передача 2 ( $i = 1 - \frac{1}{K}$ )	1,67	1,5	1,33	1,25
Повышающая передача 1 ( $i = \frac{1}{1 - \frac{1}{K}}$ )	0,6	0,67	0,75	0,8
Повышающая передача 2 ( $i = \frac{1}{1 - K}$ )	0,4	0,33	0,25	0,2
<b>Передача заднего хода</b>				
	$K=+3$		$K=+4$	
Понижающая передача ( $i = 1 - K$ )	-2		-3	

Рациональные внутренние передаточные отношения для планетарных механизмов типа 2К-Н, рассчитываемые при неподвижном водиле, должны соответствовать условию  $1,4 \leq i \leq 4$  [11–14]. В таблице 2 приведены варианты значений передаточных чисел по ступеням коробок передач в зависимости от значений внутренних передаточных отношений планетарных механизмов, рассчитанные по формуле Виллиса.

**Выводы и рекомендации.** Несмотря на известные недостатки, в некоторых случаях планетарные коробки передач с двумя степенями свободы типа 4+1, 4+2, 5+1 могут быть востребованы при необходимости быстрого освоения их локализованного производства для автоматизированных трансмиссий мобильных машин. В этом случае относительная простота реализации проекта может оказаться решающим значением с точки зрения минимизации временных и иных ресурсов.

Предлагаемые варианты построения планетарных коробок передач могут быть реализованы в мобильных машинах, для которых в первую очередь требуется упрощение управления машиной и снижение утомляемости водителя. Это, в частности, городские автобусы и другие транспортные средства с двигателями внутреннего сгорания, оснащенные блокируемым комплексным гидротрансформатором с коэффициентом трансформации порядка  $K=2-2,5$  или  $K=2,5-3$  в зависимости от характеристик двигателя и условий эксплуатации мобильной машины.

### Литература

1. Нарбут, А. Н. Гидромеханические передачи автомобилей : учебное пособие / А. Н. Нарбут. – Москва : ООО «Гринлайт+», 2010. – 192 с.
2. Косенков, А. А. Устройство автоматических коробок передач и трансмиссий / А. А. Косенков. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2003. – 416 с.
3. Харитонов, С. А. Автоматические коробки передач / С. А. Харитонов. – Москва : Астрель : АСТ, 2003. – 479 с.
4. Руденко, Н. Ф. Планетарные передачи. Теория, применение, расчет и проектирование / Н. Ф. Руденко. –

3-е изд., испр. и доп. – Москва : Машгиз, 1947. – 756 с.

5. Крюков, А. Д. Планетарные передачи в транспортных машинах / А. Д. Крюков. – Москва ; Свердловск (Урало-Сибирское отделение) : Машгиз, 1950. – 220 с.

6. Красневский, Л. Г. Управление гидромеханическими многоступенчатыми передачами мобильных машин / Л. Г. Красневский. – Минск : Наука и техника, 1990. – 256 с.

7. Харитонов, С. А. Анализ кинематических схем автоматических коробок перемены передач ZF, обладающих четырьмя степенями свободы / С. А. Харитонов, А. П. Федоренков, М. М. Нагайцев // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 5 (94). – С. 52–59.

8. Волков, Д. П. Трансмиссии строительных и дорожных машин : справочное пособие / Д. П. Волков, А. Ф. Крайнев. – Москва : Машиностроение, 1974. – 423 с.

9. Планетарные передачи. Справочник / под редакцией В. Н. Кудрявцева и Ю. Н. Кирдяшева. – Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1977. – 536 с.

10. Петров, А. В. Планетарные и гидромеханические передачи колесных и гусеничных машин / А. В. Петров. – Москва : Машиностроение, 1966. – 383 с.

11. Проектирование трансмиссий автомобилей : справочник / А. И. Гришкевич, Б. У. Бусел, Г. Ф. Бутусов [и др.] ; под общей редакцией А. И. Гришкевича. – Москва : Машиностроение, 1984. – 268 с.

12. Кирдяшев, Ю. Н. Многопоточные передачи дифференциального типа / Ю. Н. Кирдяшев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1981. – 223 с.

13. Красеньков, В. И. Проектирование планетарных механизмов транспортных машин / В. И. Красеньков, А. Д. Вашец. – Москва : Машиностроение, 1986. – 271 с.

14. Филичкин, Н. В. Анализ планетарных коробок передач транспортных и тяговых машин : учебное пособие / Н. В. Филичкин. – Челябинск : Издательство ЮУрГУ, 2008. – 178 с.

*A.V. Plyasov, N.N. Trushin*  
*Tula State University*

**KINEMATIC DIAGRAM OF PLANETARY GEARBOXES WITH TWO DEGREES  
OF FREEDOM WITHOUT CLOSED CIRCUITS**

This study proposes simple methods for the design of two-DoF planetary gearboxes. The transmission contains 2K-H elementary planetary gear sets. The gear arrangement is 4+1 (four forward, one reverse) with five control elements (four brakes and one direct drive clutch). We offer possible kinematic options for these transmissions. The proposed solutions are particularly applicable to city buses and some diesel trucks with lockable torque converters.

Vehicles, transmissions, planetary gearbox, kinematic diagram.