

Метод синтеза кинематических схем планетарных коробок передач с четырьмя степенями свободы

© С.А. Харитонов¹, М.В. Нагайцев²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, 125438, Россия

Представлен метод синтеза кинематических схем планетарных коробок передач с четырьмя степенями свободы. Приведен пример полученной с помощью предложенного метода кинематической схемы планетарной коробки передач, реализующей девять передач переднего хода и одну передачу заднего хода.

Ключевые слова: планетарная коробка передач, планетарный ряд, тормоз, блокировочная муфта.

Анализ развития автоматических коробок передач показывает стремление разработчиков снизить потери мощности при ее передаче от двигателя к ведущим колесам. Одним из основных факторов, влияющих на потери в коробке передач, является число фрикционных элементов управления, находящихся в выключенном состоянии. Чем меньше таких элементов, тем выше КПД коробки передач. Поэтому ведущие производители автоматических коробок передач, такие, например, как ZF и AW, перешли на кинематические схемы, обладающие четырьмя степенями свободы.

Известно, что для получения жесткой кинематической связи в планетарной коробке передач с четырьмя степенями свободы необходимо включать три элемента управления. Это приводит к снижению потерь в коробке передач, поскольку при одинаковом числе фрикционных элементов управления, допустим, для трех- и четырехстепенной коробок передач у последней число элементов управления, находящихся в выключенном состоянии, будет меньше.

Одной из первых фирм, которые при разработке автоматических коробок передач стали использовать схемы, обладающие четырьмя степенями свободы, была компания Mercedes, создавшая еще в 90-е годы прошлого века для своих автомобилей шестискоростную коробку 722.6.

В дальнейшем фирма ZF разработала семейство шестискоростных автоматических коробок передач, обладающих четырьмя степенями свободы. Эти коробки строились по схеме Лепелетье. По этой же схеме строит свои шестискоростные коробки передач и японская фирма AW.

В настоящее время немецкая фирма ZF выпускает восьмискоростные коробки передач для автомобилей с задним приводом и девятискоростные — для переднеприводных автомобилей. И та и другая коробка передач построены по схемам с четырьмя степенями свободы.

Таким образом, назрела необходимость разработки метода синтеза кинематических схем планетарных коробок передач, обладающих четырьмя степенями свободы.

Как известно, синтез кинематических схем планетарных коробок передач с двумя и тремя степенями свободы основывается на свойствах планов угловых скоростей.

План угловых скоростей коробки передач с двумя степенями свободы представляет собой зависимость относительных угловых скоростей звеньев планетарной коробки передач от относительной угловой скорости ведомого звена, причем за единицу угловых скоростей всех звеньев принимается угловая скорость ведущего звена. Графически это некая плоскость, в которой расположен пучок прямых, проходящий через точку с координатами $[1, 1]$, называемую масштабной точкой. Данное обстоятельство позволяет визуально изучать с помощью плана угловых скоростей свойства планетарных коробок передач с двумя степенями свободы и осуществлять синтез их кинематических схем.

План угловых скоростей трехстепенной коробки передач — это зависимость относительных угловых скоростей звеньев коробки передач от относительной угловой скорости ведомого звена и относительной угловой скорости одного из звеньев*. Графически план угловых скоростей представляет собой некое трехмерное пространство, в котором расположен пучок плоскостей, также проходящих через масштабную точку, но с координатами $[1, 1, 1]$. Естественно, проводить исследования с помощью пространственного отображения зависимостей относительных угловых скоростей от угловой скорости ведомого звена и одного из звеньев коробки передач не совсем удобно. Поэтому анализ и синтез кинематических схем осуществляют в плоскости картера коробки передач. Наличие звеньев в составе планетарного механизма на этой плоскости отображается соответствующими прямыми, которые являются геометрическим местом точек, где угловая скорость данного звена равна нулю (нулевые прямые). Это обстоятельство позволило также на плоскости картера визуально изучать свойства кинематических схем планетарных коробок передач с тремя степенями свободы и осуществлять синтез их кинематических схем.

Если же коробка передач обладает четырьмя степенями свободы, то план угловых скоростей представляет собой уже некоторое четы-

* Красеньков В.И., Вашец А.Д. Проектирование планетарных механизмов транспортных машин. М.: Машиностроение, 1986. 273 с.

рехмерное пространство. И даже переход в трехмерное пространство картера не позволяет визуально проводить анализ и синтез кинематических схем планетарных коробок передач, обладающих четырьмя степенями свободы.

В связи с этим были разработаны алгоритм и программный комплекс, позволяющие синтезировать кинематические схемы планетарных коробок передач с четырьмя степенями свободы.

Рассмотрим метод синтеза четырехстепенных коробок передач на примере синтеза девятиступенчатой коробки передач.

Исходные данные для синтеза кинематической схемы планетарной коробки передач с четырьмя степенями свободы, реализующей девять передач переднего хода и одну передачу заднего хода (ЗХ), представлены ниже:

Передача.....	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	ЗХ
Передаточное отношение.....	5,85	2,96	2,00	1,50	1,20	1,00	0,85	0,74	0,66	-5,70

При синтезе кинематических схем в программный комплекс было введено условие использования планетарных рядов только второго класса с одновенцовыми сателлитами, поскольку эти механизмы являются наиболее простыми и обладают высоким коэффициентом полезного действия (КПД).

Практика синтеза кинематических схем с четырьмя степенями свободы показывает, что для реализации планетарной коробки передач с девятью передачами переднего хода и одной передачей заднего хода необходимо, чтобы в ее состав входило четыре планетарных ряда, три блокировочные муфты; при этом три звена должны быть оборудованы тормозами.

Три блокировочные муфты при одновременном включении позволяют получать прямую передачу. При этом потери мощности в зубчатых зацеплениях равны нулю, поскольку все звенья коробки передач вращаются с угловой скоростью, равной угловой скорости ведущего звена.

Для получения кинематической схемы, обладающей высокими кинематическими и силовыми характеристиками, при ее синтезе введен ряд допущений и ограничений:

Число планетарных механизмов.....	4
Число звеньев, оборудованных тормозом.....	3
Число блокировочных муфт.....	3
Минимальный КПД на передачах.....	0,92
Максимальная относительная угловая скорость сателлитов.....	5
Внутреннее передаточное отношение планетарных рядов:	
минимальное.....	1,07
максимальное	5

Поскольку синтезируемая кинематическая схема планетарной коробки передач обладает четырьмя степенями свободы и состоит из четырех планетарных рядов, то в ее состав в соответствии с формулой Чебышёва должно входить восемь звеньев:

$$n_{зв} = K_{мех} + W = 4 + 4 = 8,$$

где $n_{зв}$, $K_{мех}$ — число звеньев и планетарных механизмов, которые должны войти в состав кинематической схемы; W — число степеней свободы.

Из восьми звеньев можно получить 56 вариантов сочетаний по три звена (табл. 1); индекс 1 присвоен ведущему звену коробки передач, индекс 8 — ведомому звену.

Из каждого сочетания трех звеньев, как известно, можно составить три адекватных по своим кинематическим свойствам планетарных рядов, принимая в качестве водила по очереди каждое из трех звеньев. При этом два из трех планетарных рядов будут относиться к первому классу и один — ко второму классу. Таким образом, число планетарных рядов, которые можно получить из восьми звеньев, равно 168. Однако, если учитывать условие использования в составе кинематической схемы только планетарных рядов второго класса, то число планетарных рядов, которые можно составить из восьми звеньев, останется равным числу сочетаний, т. е. 56.

Таблица 1

Возможные сочетания восьми звеньев по три

Сочетание			Сочетание			Сочетание		
1	2	3	1	6	8	3	4	7
1	2	4	1	7	8	3	4	8
1	2	5	2	3	4	3	5	6
1	2	6	2	3	5	3	5	7
1	2	7	2	3	6	3	5	8
1	2	8	2	3	7	3	6	7
1	3	4	2	3	8	3	6	8
1	3	5	2	4	5	3	7	8
1	3	6	2	4	6	4	5	6
1	3	7	2	4	7	4	5	7
1	3	8	2	4	8	4	5	8
1	4	5	2	5	6	4	6	7
1	4	6	2	5	7	4	6	8
1	4	7	2	5	8	4	7	8
1	4	8	2	6	7	5	6	7
1	5	6	2	6	8	5	6	8
1	5	7	2	7	8	5	7	8
1	5	8	3	4	5	6	7	8
1	6	7	3	4	6	—	—	—

Ранее было оговорено, что кинематическая схема должна содержать четыре планетарных ряда, поэтому, очевидно, необходимо рассмотреть все возможные варианты сочетаний из 56 планетарных рядов по четыре. Таких сочетаний в данном случае наберется $K_{с\text{ ПР}}$:

$$K_{с\text{ ПР}} = C_{56}^4 = 210.$$

Далее для каждого сочетания планетарных рядов необходимо рассмотреть все возможные варианты оборудования звеньев тормозами. Если иметь в виду, что ведущее звено 1 и ведомое звено 8 тормозами не оборудуются и в кинематической схеме три звена должны иметь тормозные устройства, то число таких вариантов $K_{с\text{ тор}}$ определится как число сочетаний из шести звеньев по три:

$$K_{с\text{ тор}} = C_6^3 = 20.$$

И, наконец, для каждого сочетания планетарных рядов и звеньев, оборудованных тормозами, следует рассмотреть все возможные варианты установки блокировочных муфт. Число таких вариантов $K_{с\text{ БМ}}$ определится числом сочетаний из восьми звеньев по два:

$$K_{с\text{ БМ}} = C_8^2 = 28.$$

Учитывая то обстоятельство, что между ведущим и ведомыми звеньями блокировочную муфту не устанавливают, следует оставить только 27 вариантов установки блокировочных муфт.

Как отмечалось, желательно, чтобы в составе коробки передач было как минимум три блокировочные муфты, поэтому необходимо рассмотреть все варианты сочетания 27 муфт по три:

$$K_{с\text{ БМ}} = C_{27}^3 = 2925,$$

т. е. имеем 2 925 вариантов установки трех блокировочных муфт.

В общем случае число рассматриваемых вариантов

$$K_{\text{вар}} = K_{с\text{ ПР}} K_{с\text{ тор}} K_{с\text{ БМ}} = 210 \cdot 20 \cdot 2\,925 = 12\,285\,000.$$

Теперь для каждого из определенных вариантов $K_{\text{вар}}$ рассмотрим все возможные варианты расстановки рабочих точек по передачам. Число рабочих точек $K_{р.т}$ в данном случае равно числу сочетаний из числа элементов управлений по три:

$$K_{р.т} = C_6^3 = 20.$$

Другими словами, в коробке передач, имеющей шесть элементов управления, можно получить 20 передач.

В общем случае число вариантов расстановки $K_{\text{рст}}$ рабочих точек определяется числом перестановок из 20 элементов:

$$K_{\text{рст}} = \Pi_{20} = 20! = 2\,432\,902\,008\,176\,640\,000.$$

Таким образом, для синтеза кинематической схемы с заданными техническим заданием характеристиками необходимо рассмотреть $K_{\text{вар}}$ вариантов кинематических схем и для каждого варианта исследовать еще $K_{\text{рст}}$ расстановок рабочих точек по передачам.

Однако следует сразу оговориться и отметить, что, как известно, не все варианты кинематических схем физически реализуемы. В процессе работы над программным комплексом синтеза кинематических схем четырехстепенных планетарных коробок передач был выработан ряд критериев, позволяющих на самом первом этапе формирования числа сочетаний кинематических схем определять возможность физической реализации каждого варианта сочетания планетарных рядов и элементов управления.

Дальнейшее решение задачи осуществляется с использованием метода прогноза и коррекции. На первом этапе задаются ориентировочные значения внутренних передаточных отношений всех четырех планетарных рядов. Рассчитываются передаточные отношения коробки передач на всех 20 рабочих точках. При этом определяется число инвариантных режимов работы коробки передач и число режимов, позволяющих формировать передаточные отношения коробки передач. Если число последних больше числа передач, заданных в техническом задании, или равно ему, то такой вариант оставляется для дальнейшего рассмотрения. В противном случае вариант исключают из дальнейшего рассмотрения.

Далее для оставшихся вариантов осуществляется оптимизация значений внутренних передаточных отношений планетарных рядов, целью которой является получение передаточных отношений коробки передач, соответствующих заданным в техническом задании значениям.

На следующих этапах выполняются проверка на то, чтобы все звенья входили в состав планетарного механизма, и проверка на неразрывность потока мощности при переключении передач.

В результате было получено более 300 вариантов построения кинематической схемы девятиступенчатой коробки передач, из которых только 10 полностью отвечают техническому заданию.

На рис. 1 показана кинематическая схема, построенная для одного из 10 упомянутых выше вариантов. Сочетания планетарных рядов, их внутренние передаточные отношения, номера звеньев, оборудованных тормозами, а также сочетание блокировочных муфт представлены в табл. 2.

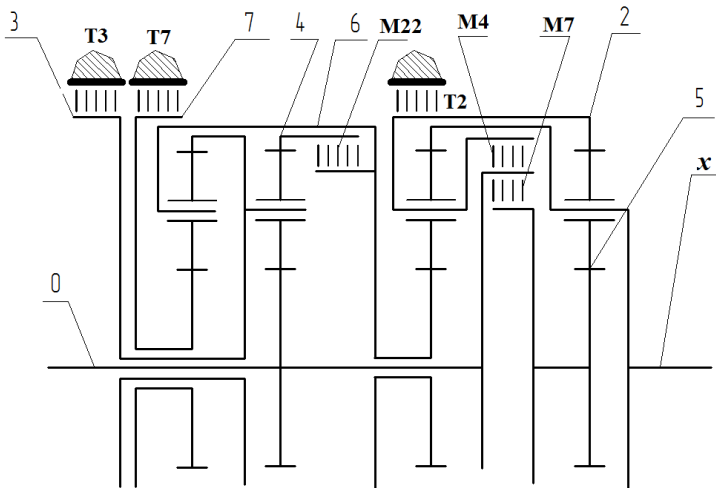


Рис. 1. Кинематическая схема, построенная для одного из вариантов сочетания планетарных рядов и элементов управления

Таблица 2

Сочетания планетарных рядов и элементов управления

Планетарные ряды	Внутреннее передаточное отношение планетарного ряда	Звенья, соединяемые блокировочными муфтами	Номер звена, оборудованного тормозом
763	-3,060	0 — 2 (M4) 0 — 5 (M7) 4 — 6 (M22)	2 (T2)
034	-2,049		3 (T3)
62x	-2,856		7 (T7)
5x2	-1,956		

В табл. 3 даны характеристики кинематической схемы, приведенной на рис. 1 (передаточные отношения, элементы управления, включаемые на передачах, КПД зубчатых зацеплений и др.).

Сравнение передаточных отношений, установленных техническим заданием и полученных в результате синтеза, показывает их практически полное совпадение.

Представленная на рис. 1 кинематическая схема может быть использована как для заднеприводных, так и для переднеприводных автомобилей с продольным расположением двигателя. В случае поперечного расположения двигателя осевые размеры коробки передач весьма ограничены, что, по-видимому, не позволит разместить ее в моторно-трансмиссионном отделении вследствие больших осевых размеров. Поэтому указанную схему можно преобразовать таким образом, что осевой размер коробки передач будет значительно уменьшен (рис. 2).

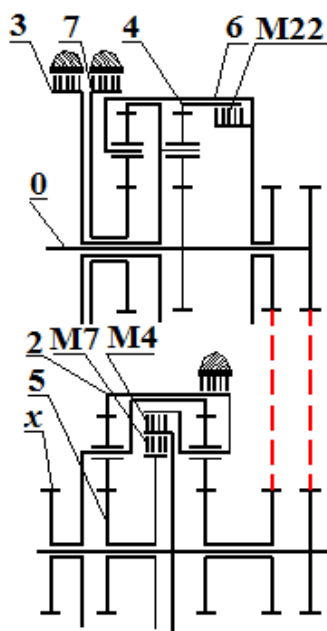


Рис. 2. Кинематическая схема, предназначенная для переднеприводных автомобилей с поперечным расположением двигателя

Таблица 3

Характеристики кинематической схемы

Номер передачи	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	XI	3X
Включаемые ЭУ	T2;T3; M22	T2;M7; M22	T3;M7; M22	T3;T7; M7	T7;M7; M22	M4;M7; M22	T7;M4; M22	T3;T7; M4	T3;M4; M22	T2;T7; M22
i_{0x}	5,85	2,95	2,0	1,5	1,2	1,0	0,85	0,74	0,65	-5,7
Коэффициент геометрической прогрессии q	—	1,983	1,475	1,333	1,25	1,2	1,176	1,149	1,138	—
КПД зубчатых зацеплений	0,941	0,98	0,957	0,983	0,988	1	0,992	0,992	0,986	0,946

Соединение одноименных звеньев, входящих в верхнюю и нижнюю части схемы (звенья 0 и 6), возможно осуществить с помощью цепной либо зубчатой передачи.

В заключение следует отметить, что разработанный метод позволяет синтезировать кинематические схемы, обладающие как четырьмя, так и тремя степенями свободы с любым числом планетарных рядов и элементов управления.

Статья поступила в редакцию 10.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Харитонов С.А., Нагайцев М.В. Метод синтеза кинематических схем планетарных коробок передач с четырьмя степенями свободы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/978.html>

Харитонов Сергей Александрович родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sintespkr@yandex.ru

Нагайцев Максим Валерьевич родился в 1968 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1991 г. Канд. техн. наук, генеральный директор ФГУП «НАМИ». Автор более 50 статей в области автомобилестроения.