



**ХАРИТОНОВ**  
Сергей Александрович  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**KHARITONOV**  
Sergey Aleksandrovich  
(Moscow, Russian Federation,  
Bauman Moscow State  
Technical University)



**НАГАЙЦЕВ**  
Максим Валерьевич  
(НПО ФГУП «НАМИ»)

**NAGAYTSEV**  
Maksim Valer'evich  
(Moscow, Russian Federation,  
Federal State Unitary Enterprise  
«Central Scientific Research  
Automobile and Engine  
Institute»)

## Основы планов угловых скоростей трехстепенных планетарных коробок передач, обеспечивающих шесть передач переднего хода

**С.А. Харитонов, М.В. Нагайцев**

*Одним из путей улучшения топливно-экономических характеристик в современном транспортном машиностроении является увеличение числа ступеней в планетарных коробках передач, в том числе и автоматических (АКПП). В большинстве АКПП используются планетарные механизмы, синтез кинематических схем которых представляет собой весьма трудоемкую задачу. Для решения этой задачи в работе определены основы планов угловых скоростей, позволяющие синтезировать кинематические схемы планетарных коробок передач, реализующих шесть передач переднего хода. Показаны варианты перехода от основ планов угловых скоростей к самим планам. Полученные основы планов угловых скоростей трехстепенных планетарных коробок передач позволяют синтезировать коробки с шестью передачами переднего хода.*

**Ключевые слова:** план угловых скоростей, кинематическая схема, планетарная коробка передач.

## Elements of angular velocity plans for three-degree-of-freedom planetary gearboxes providing six forward gears

**S.A. Kharitonov, M.V. Nagaytsev**

*The most important problem of modern transport engineering is to improve fuel and economic characteristics. One of the ways to solve this problem is to increase the number of drive stages in both manual and automatic transmissions. Most automatic transmissions use planetary gears. The synthesis of kinematic diagrams of such mechanisms is a time-consuming problem. To solve this problem, the elements of angular velocity plans are formulated, which makes it possible to synthesize kinematic diagrams of planetary gearboxes with six forward gears. It is shown how to transform the elements of angular velocity plans into the plans themselves. The obtained elements of angular velocity plans for three-degree-of-freedom planetary gearboxes make it possible to synthesize gearboxes with six forward gears.*

**Keywords:** angular velocity plan, kinematic diagram, planetary gearbox.

**А**нализ развития коробок перемены передач (КПП) легковых автомобилей, в особенности автоматических, показывает устойчивую тенденцию увеличения количества передач переднего хода. Так, если до середины 80-х годов прошлого столетия автомобили оснаща-

лись всего лишь трехступенчатыми автоматическими коробками перемены передач (АКПП), то в настоящее время многие автомобили оснащаются уже шестиступенчатыми, а на автомобили BMW седьмой серии устанавливают уже восьмиступенчатые АКПП, разработанные немецкой фирмой ZF.

В подавляющем большинстве АКПП используются планетарные передачи, которые обладают рядом неоспоримых преимуществ и наиболее перспективны с точки зрения увеличения количества передач без значительного изменения массо-габаритных показателей. Так, опыт синтеза кинематических схем планетарных КПП показывает, что для реализации трех или четырех передач вполне достаточно двух планетарных рядов. Для получения от пяти до семи передач требуется только три планетарных ряда.

В настоящее время в АКПП используются планетарные механизмы с двумя, тремя и четырьмя степенями свободы. С точки зрения управления наиболее предпочтительными являются планетарные коробки передач с двумя степенями свободы, поскольку в этом случае при переключении передачи нужно выключить один элемент управления и включить один элемент управления, что важно для обеспечения неразрывности потока мощности от двигателя к ведущим колесам и обеспечения требуемого качества переключения передач. Недостаток двухступенчатых планетарных КПП заключается в том, что количество планетарных рядов равно количеству передач, реализуемых этой коробкой, без учета прямой передачи, а число элементов управления соответствует количеству передач [1–8].

В планетарной КПП с тремя степенями свободы один и тот же элемент управления используется на нескольких передачах, что позволяет по сравнению с двухступенчатыми КПП при равном количестве элементов управления получить гораздо большее число передач.

Одним из самых важных и определяющих моментов при проектировании планетарной КПП является синтез ее кинематической схемы. Это

весьма сложная и трудоемкая процедура, требующая рассмотрения огромного количества вариантов. Результатом синтеза должна стать кинематическая схема, в полной мере отвечающая требованиям разработчиков как по кинематическим и силовым характеристикам, так и возможности ее конструктивной реализации.

В случае, если в трехступенчатой КПП предполагается использовать автоматическую систему управления, то к кинематической схеме предъявляется дополнительное требование. Суть этого требования заключается в том, что при переключении передач необходимо обеспечить неразрывность потока мощности. Это достигается за счет того, что один из двух включенных на текущей передаче фрикционных элементов управления должен оставаться во включенном состоянии, а выключение второго фрикционного элемента управления должно происходить параллельно с включением элемента управления, используемого на последующей передаче.

Процесс синтеза кинематической схемы трехступенчатой планетарной КПП основывается на свойствах плана угловых скоростей таких коробок и осуществляется в два этапа [1]. На первом этапе происходит построение основы плана угловых скоростей, на которой имеются все рабочие точки, отвечающие всем определенным техническим заданием требованиям. На втором этапе с помощью введения нулевых прямых вспомогательных звеньев образовывается требуемое количество планетарных рядов и блокировочных муфт.

Остановимся более подробно на решении задачи первого этапа. Поставим задачу расположить на плане угловых скоростей нулевые прямые звеньев так, чтобы точки их пересечения (рабочие точки) позволяли получить определенные техническим заданием передаточные отношения проектируемой КПП. Кроме того, для получения требуемого количества планетарных механизмов и блокировочных муфт необходимо чтобы было определенное количест-

во точек, в которых пересекалось бы три и более нулевых прямых.

Найдем основы планов угловых скоростей трехстепенных планетарных КПП, отвечающие следующим требованиям:

- 1) КПП должна иметь шесть передач переднего хода;
- 2) переключение передач должно происходить без разрыва потока мощности;
- 3) для перехода от основы к плану угловых скоростей необходимо введение только одного вспомогательного звена.

Для обеспечения первого требования КПП, как показывает опыт синтеза, должна иметь в своем составе три планетарных ряда и две блокировочные муфты. Третье требование диктует необходимость иметь на основе плана угловых скоростей приведенную ниже комбинацию из трех механизмов:

- три планетарных ряда;
- два планетарных ряда и блокировочную муфту;
- планетарный ряд и две блокировочные муфты.

В результате большого объема проведенных работ были получены семь основ планов угловых скоростей, отвечающие указанным выше требованиям.

Одна из основ планов угловых скоростей представлена на рис. 1, а. Здесь и далее на всех остальных основах планов угловых скоростей прямые 2, 3 и 4 — нулевые прямые звеньев планетарной коробки передач, оборудованных тормозами,  $x$  — нулевая прямая ведомого звена коробки передач, 6 и 7 — нулевые прямые условных звеньев блокировочных муфт.

Основа планов угловых скоростей, представленная на рис. 1, а, имеет семь рабочих точек, шесть из которых ( $A, B, C, D, e$  и  $F$ ) расположены над нулевой прямой ведомого звена  $x$  и определяют передачи переднего хода. При этом из шести передач переднего хода одна передача повышающая (точка  $F$ ), одна прямая (точка  $e$ ) и четыре понижающие. Одна рабочая точка ( $G$ ) расположена ниже нулевой прямой  $x$  и обуславливает в коробке наличие передачи заднего хода.

Данная основа планов угловых скоростей обеспечивает организацию одного планетарно-

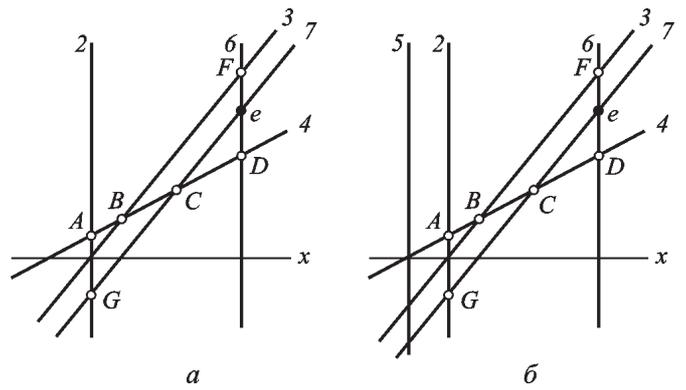


Рис. 1. Основа планов угловых скоростей № 1 (а) и вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена (б)

го ряда и двух блокировочных муфт. Пересечение нулевых прямых звеньев 2, 3 и  $x$  в одной точке определяет формирование планетарного ряда. Причем, в зависимости от того, какому из трех звеньев будет назначена функция водила, зависит к какому классу планетарных рядов будет относиться планетарный ряд. Если в качестве водила назначить звено 2, то структура планетарного ряда будет следующей: малым центральным колесом (МЦК) должно быть назначено звено 3, а большим центральным колесом (БЦК) — ведомое звено  $x$ , т. е. используя принятое в практике синтеза сложных планетарных механизмов обозначение планетарных рядов, получим планетарный ряд  $32x$ . Следует отметить, что данный планетарный ряд относится ко второму классу планетарных рядов, поскольку в этом случае его внутреннее передаточное отношение, определенное при остановленном водиле, будет иметь отрицательное значение. В двух других случаях, если принять в качестве водила звено 3 или  $x$ , то получим соответственно планетарные ряды  $x32$  и  $3x2$ , которые будут относиться к первому классу планетарных рядов, поскольку их внутренние передаточные отношения, определенные при остановленном водиле, будут иметь положительные значения.

Параллельность на основе плана угловых скоростей нулевых прямых 3 и 7 позволяет организовать между ведущим звеном 0 и звеном 3 блокировочную муфту. Кроме того, на основе плана угловых скоростей имеются еще две па-

параллельные нулевые прямые, одна из которых проходит через масштабную точку  $e$ . Это обстоятельство позволяет получить еще одну блокировочную муфту, соединяющую ведущее звено  $0$  и звено  $2$ .

Таким образом, на данной основе плана угловых скоростей отобрано наличие одного планетарного ряда и двух блокировочных муфт. В соответствии с формулой Чебышева планетарный механизм коробки передач, состоящий из пяти звеньев (ведущее  $0$ , ведомое  $x$ , и звенья  $2$ ,  $3$  и  $4$ ), должен содержать два планетарных ряда:

$$k_{п.р} = n_{зв} - w = 5 - 3 = 2,$$

где  $k_{п.р}$  — число планетарных рядов;  $n_{зв}$  — число звеньев, входящих в состав планетарного механизма;  $w$  — число степеней свободы коробки передач.

Для получения требуемого количества планетарных рядов необходимо введение вспомогательного звена, что на основе плана угловых скоростей отразится появлением еще одной нулевой прямой. Как правило, вспомогательные звенья не оборудуются тормозом, хотя не исключаются варианты, когда это необходимо сделать.

В соответствии с формулой Чебышева увеличение количества звеньев с пяти до шести автоматически приводит и к увеличению числа планетарных рядов, которые должна содержать планетарная коробка передач с тремя степенями свободы, т. е. в нашем случае коробка должна содержать три планетарных ряда. Поэтому для выполнения этого требования необходимо с помощью вспомогательного звена организовать уже не один, а два планетарных ряда. Это достаточно просто решается с помощью основы плана угловых скоростей. Нулевую прямую вспомогательного звена следует провести таким образом, чтобы она прошла либо через две точки, образованные пересечением двух и более нулевых, ни одна из которых не должна проходить через масштабную точку  $e$ , либо через точку пересечения двух и более не проходящих через масштабную точку  $e$  нулевых прямых параллельно какой-либо нулевой прямой,

также не проходящей через масштабную точку  $e$ . В нашем случае при проведении нулевой прямой вспомогательного звена накладываются некоторые ограничения. В уже имеющийся планетарный ряд вошли звенья  $2$ ,  $3$  и  $x$ , а ведущее звено  $0$  и звено  $4$  пока не задействованы. Поэтому при введении в состав планетарной коробки передач вспомогательного звена необходимо, чтобы во вновь образованные с его помощью планетарные ряды обязательно вошли ведущее звено  $0$  и звено  $4$ . Следует отметить, что наличие в составе планетарного ряда ведущего звена  $0$  отражается на плане угловых скоростей параллельностью двух и более нулевых прямых, ни одна из которых не должна проходить через масштабную точку  $e$ .

Очевидно, что в рассматриваемом случае решение задачи введения вспомогательного звена имеет несколько вариантов. Так, нулевую прямую вспомогательного звена  $5$  можно провести, например, через точку пересечения нулевых прямых  $4$  и  $x$ , параллельно нулевой прямой звена  $2$  (рис. 1, б).

В этом случае пересечение трех нулевых прямых  $4$ ,  $5$  и  $x$  позволяет из этих звеньев составить планетарный ряд, а параллельность нулевых прямых  $2$  и  $5$  позволяет получить еще один планетарный ряд, в который помимо этих двух звеньев должно войти еще и ведущее звено  $0$ . Таким образом, получено два планетарных ряда, в которые вошли в соответствии с выше сформулированным требованием звенья  $0$  и  $4$ .

Параллельность трех нулевых прямых  $2$ ,  $5$  и  $6$ , из которых нулевая прямая  $6$  проходит через масштабную точку  $e$ , позволяет образовать три блокировочные муфты  $0\tilde{b}2$ ,  $0\tilde{b}5$  и  $2\tilde{b}5$ . Причем, в состав кинематической схемы можно взять только одну из них. При этом независимо от того какая муфта использована кинематические свойства коробки передач останутся неизменными.

Другие варианты проведения нулевой прямой вспомогательного звена  $5$  и образующиеся при этом планетарные ряды и блокировочные муфты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена	Планетарный ряд	Блокировочная муфта
Через точки 4х параллельно прямой 2	32х; 052; 4х5	07̃3; 06̃2
		07̃3; 06̃5
		07̃3; 26̃5
Через точки 4х параллельно прямой 3	32х; 350; 5х4	07̃3; 06̃2
		07̃5; 06̃2
		37̃5; 06̃2
Через точки 24 параллельно прямой 3	32х; 053; 425	07̃3; 06̃2
Через точки 24 параллельно прямой х	32х; 0х5; 452	07̃3; 06̃2
Через точки 34 параллельно прямой 2	32х; 025; 354	07̃3; 06̃2
Через точки 34 параллельно прямой х	32х; 0х5; 354	07̃3; 06̃2
Через точки 23 параллельно прямой 4	32х; 325; 054	07̃3; 07̃2
	32х; 2х5; 054	
	32х; 3х5; 054	
	325; 2х5; 054	
	325; 3х5; 054	
	2х5; 3х5; 054	

Так же, как и в первом варианте, во втором варианте проведения нулевой прямой вспомогательного звена за счет параллельности нулевых прямых 3, 5 и 7 возможно образовать три блокировочные муфты 07̃3, 07̃5 и 37̃5.

В случае проведения нулевой прямой вспомогательного звена через точку 23 параллельно нулевой прямой звена 4, в одной точке пересекаются нулевые прямые четырех звеньев — 2, 3, 5 и х. Как известно из теории синтеза сложных планетарных механизмов [1], из этих четырех звеньев можно образовать четыре планетарных ряда, причем в состав кинематической схемы можно взять только два. Таким образом, этот вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена позволяет получить шесть вариантов сочетания планетарных рядов по два, к которым каждый раз добавляется планетарный ряд 045.

Все представленные в табл. 1 планетарные ряды относятся ко второму классу. Как известно из теории синтеза сложных планетарных механизмов [1], из трех звеньев можно образо-

вать, принимая поочередно за водило каждое звено, три равнозначных планетарных ряда, причем два из них будут относиться к первому классу и один ко второму классу. Поэтому, если учесть это обстоятельство, то количество вариантов комбинаций планетарных рядов многократно возрастет.

Основа планов угловых скоростей, представленная на рис. 2, а, позволяет получить семь передач переднего хода (точки А, В, С, D, е, F и К), причем точка F обуславливает наличие в коробке передач повышающей передачи, точка е — прямую передачу, а остальные пять точек — понижающие передачи. Однако, следует отметить, что использование рабочей точки К не позволяет обеспечить неразрывность потока мощности при переключении с передачи, полученной с помощью этой рабочей точки, на следующую высшую передачу. Данное обстоятельство вынуждает отказаться от использования рабочей точки К. Таким образом, кинематическая схема коробки, синтезированная с помощью такой основы плана угловых скоростей, будет иметь шесть передач переднего хода и одну передачу заднего хода.

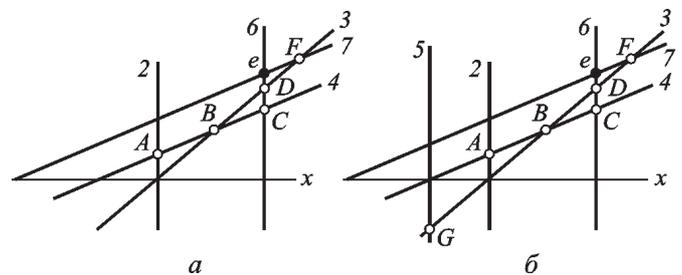


Рис. 2. Основа планов угловых скоростей № 2 (а) и вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена (б)

В отличие от основы планов угловых скоростей, представленной на рис. 1, а, данная основа не содержит рабочей точки, обеспечивающей передачу заднего хода.

На основе планов угловых скоростей имеют следующие планетарные ряды и блокировочные муфты:

- планетарный ряд, составленный из звеньев 2, 3 и х (их нулевые пересекаются в одной точке);
- блокировочная муфта, соединяющая ведущее звено 0 и звено 2 (нулевые прямые 2 и б параллельны);

- блокировочная муфта, соединяющая ведущее звено 0 и звено 4 (нулевые прямые 4 и 7 параллельны).

Так же, как и в предыдущем варианте построения основы планов угловых скоростей (см. рис. 1, а), ведущее звено 0 и звено 4 не вошли в состав единственного имеющегося планетарного ряда, поэтому при введении вспомогательного звена необходимо, чтобы во вновь образованные планетарные ряды вошли эти два звена. Кроме того, следует иметь в виду, что рассматриваемая основа планов угловых скоростей не обеспечивает в коробке передачу заднего хода. Поэтому при введении вспомогательного звена 5 его нулевую прямую следует провести таким образом, чтобы ее пересечение с какой-либо другой нулевой прямой позволило организовать рабочую точку, расположенную ниже нулевой прямой ведомого звена  $x$ . В этом случае необходимо будет оборудовать вспомогательное звено 5 тормозом.

Таким образом, при введении нулевой прямой вспомогательного звена следует выполнить следующие условия:

- образовать два планетарных ряда;
- во вновь образованные планетарные ряды обязательно должны войти ведущее звено 0 и звено 4;
- получить рабочую точку, обеспечивающую передачу заднего хода.

Проведение нулевой прямой вспомогательного звена 5, удовлетворяющее указанным требованиям, возможно только одним способом. Ее следует провести через точку пересечения нулевых прямых ведомого звена  $x$  и звена 4 параллельно нулевой прямой звена 2. В этом случае пересечение нулевых прямых 4,  $x$  и 5 позволяет организовать планетарный ряд, содержащий звено 4, а параллельность нулевых прямых 2 и 5 — планетарный ряд, в состав которого должно входить ведущее звено 0. Кроме того, если оборудовать вспомогательное звено 5 тормозом, то одновременное включение тормоза этого звена и тормоза звена 3 позволяет получить в коробке передачу заднего хода, что отражается на плане угловых скоростей (рис. 2, б) рабочей точкой  $G$ .

Следует отметить, что параллельность трех нулевых прямых 2, 5 и 6 позволяет организовать три блокировочные муфты  $0\tilde{b}2$ ,  $0\tilde{b}5$  и  $2\tilde{b}5$ , из которых в состав синтезируемой кинематической схемы можно взять только одну.

Основа планов угловых скоростей, представленная на рис. 3, а, имеет шесть рабочих точек, расположенных над нулевой прямой ведомого звена  $x$ , и ни одной рабочей точки под ней. Таким образом, данная основа обеспечивает шесть передач переднего хода и не имеет ни одной передачи заднего хода. Из шести передач переднего хода три понижающие (см. рис. 3, а точки  $A$ ,  $B$  и  $C$ ), одна прямая (точка  $e$ ) и две повышающие (точки  $D$  и  $F$ ).

Параллельность нулевых прямых 2, 3 и 6 позволяет организовать один планетарный ряд, состоящий из звеньев 0, 2 и 3, и три блокировочные муфты  $0\tilde{b}2$ ,  $0\tilde{b}3$  и  $2\tilde{b}3$ . Пересечение нулевых прямых 2, 4 и  $x$  в одной точке дает возможность получить из этих звеньев еще один планетарный ряд. В результате на рассматриваемой основе плана угловых скоростей имеются два планетарных ряда и одна блокировочная муфта.

Таким образом, при переходе от основы планов угловых скоростей к плану с помощью нулевой прямой вспомогательного звена необходимо организовать еще один планетарный ряд и одну блокировочную муфту с условным звеном 7. Кроме того, с помощью нулевой прямой вспомога-

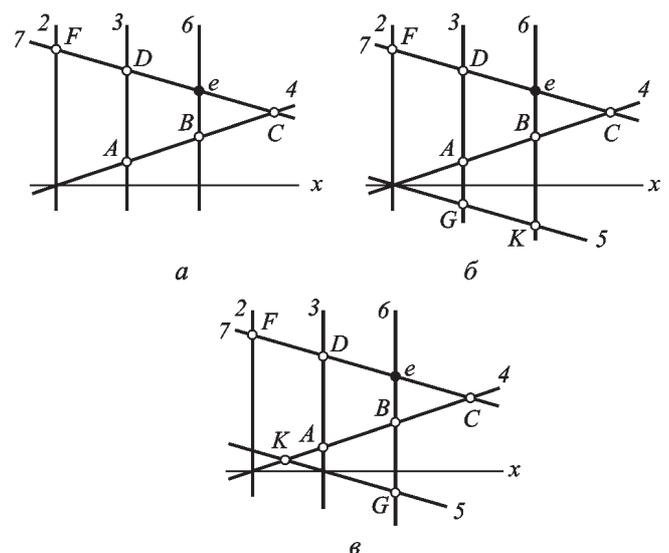


Рис. 3. Основа планов угловых скоростей № 3 (а), первый (б) и второй (в) варианты проведения нулевой прямой вспомогательного звена

тельного звена следует получить рабочую точку, обеспечивающую коробке передачу заднего хода. Эти два обстоятельства и определяют варианты проведения нулевой прямой вспомогательного звена. И таких вариантов существует всего два.

Первый вариант, удовлетворяющий указанным требованиям для данной основы планов угловых скоростей, это проведение нулевой прямой вспомогательного звена 5 через точку пересечения нулевых прямых звеньев 2, 4 и  $x$  параллельно нулевой прямой условного звена блокировочной муфты 7 (рис. 3, б). В этом случае образуются две рабочие точки  $G$  и  $K$ , расположенные под нулевой прямой ведомого звена, что обеспечивает в случае оборудования вспомогательного звена тормозом две передачи заднего хода. Параллельность нулевых прямых 5 и 7 дает возможность установить между ведущим звеном 0 и звеном 5 блокировочную муфту  $0\tilde{7}5$ . Пересечение нулевых прямых звеньев 2, 4, 5 и  $x$  в одной точке позволяет организовать из этих звеньев четыре планетарных ряда  $425$ ,  $4x2$ ,  $25x$  и  $4x5$ , из которых в состав кинематической схемы проектируемой коробки передач можно взять только два. Таких вариантов сочетаний из этих четырех механизмов по два будет шесть (табл. 2).

Таблица 2

Планетарный ряд	Блокировочная муфта	Планетарный ряд	Блокировочная муфта
425; 4x2; 023	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}2$	4x2; 25x; 023	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}2$
	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}3$		$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}3$
	$0\tilde{7}5; 2\tilde{6}3$		$0\tilde{7}5; 2\tilde{6}3$
425; 25x; 023	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}2$	4x2; 4x5; 023	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}2$
	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}3$		$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}3$
	$0\tilde{7}5; 2\tilde{6}3$		$0\tilde{7}5; 2\tilde{6}3$
425; 4x5; 023	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}2$	25x; 4x5; 023	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}2$
	$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}3$		$0\tilde{7}5; 0\tilde{6}3$
	$0\tilde{7}5; 2\tilde{6}3$		$0\tilde{7}5; 2\tilde{6}3$

Во втором варианте проведем нулевую прямую через точку пересечения нулевых прямых 3 и 4 параллельно нулевой прямой условного звена блокировочной муфты 7 (рис. 3, в). В этом случае образуются три дополнительные рабочие точки, расположенные относительно

нулевой прямой ведомого звена  $x$  по разные стороны. Это означает, что одна из них соответствует передаче заднего хода (точка  $G$ ). Вторая позволяет организовать еще одну понижающую передачу переднего хода (точка  $K$ ). Третья точка, полученная за счет пересечения нулевых прямых 2 и 5, не отвечает требованию неразрывности потока мощности при переключении и поэтому исключена из дальнейшего рассмотрения.

Параллельность нулевых прямых 5 и 7 дает возможность установить блокировочную муфту между ведущим звеном 0 и вспомогательным звеном 5 —  $0\tilde{7}5$ . Пересечение трех нулевых прямых 3, 5 и  $x$  позволяет организовать недостающий планетарный ряд  $35x$ .

Существует еще один вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена, который отвечал бы сформулированным для рассматриваемой основы плана угловых скоростей требованиям. Можно провести нулевую прямую вспомогательного звена через рабочие точки  $F$  и  $A$ . За счет пересечения в точке  $F$  нулевых прямых 2, 5 и 7 организовывается блокировочная муфта  $2\tilde{7}5$ , а пересечение нулевых прямых 3, 4 и 5 дает возможность построить планетарный ряд  $453$ . Однако рабочая точка, полученная при пересечении нулевых прямых 5 и 6, будет расположена от нулевой прямой  $x$  очень далеко. Это означает, что абсолютная величина передаточного отношения коробки на передаче заднего хода будет близка к единице, однако это не устроит ни одного производителя транспортных средств.

Представленная на рис. 4, а основа планов угловых скоростей очень схожа с предыдущей основой плана угловых скоростей, приведен-

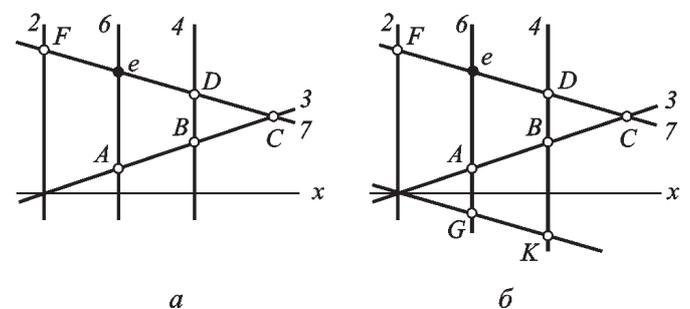


Рис. 4. Основа планов угловых скоростей № 4 (а) и вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена (б)

ной на рис. 3, в. Отличием является лишь то, что масштабная точка *e* расположена несколько иначе. Поэтому данная основа планов угловых скоростей позволяет организовать также только шесть передач переднего хода, но из них четыре обеспечивают понижающие передачи (точки *A*, *B*, *C* и *D*), одна прямую (точка *e*) и одна повышающую передачу (точка *F*). Также как и в предыдущем случае на этой основе планов угловых скоростей отсутствует рабочая точка, соответствующая передаче заднего хода. Данное обстоятельство накладывает определенные ограничения на проведение нулевой прямой вспомогательного звена — ее следует проводить так, чтобы была получена рабочая точка, соответствующая передаче заднего хода.

Несложный анализ представленной на рис. 4, а основы плана угловых скоростей показывает, что она содержит два планетарных ряда, один из которых состоит из звеньев 0, 2 и 4 (параллельность нулевых прямых 2 и 4), а второй из звеньев 2, 3 и *x* (пересечение соответствующих нулевых прямых в одной точке). Кроме того, параллельность нулевых прямых 2, 4 и 6 позволяет организовать блокировочные муфты с условным звеном 6 — 0 $\tilde{6}$ 2, 0 $\tilde{6}$ 4 и 2 $\tilde{6}$ 4.

При проведении нулевой прямой вспомогательного звена необходимо выполнить три условия: обеспечить получение одного планетарного ряда, одной блокировочной муфты с условным звеном 7 и рабочей точки, обеспечивающей передачу заднего хода. Единственным вариантом, удовлетворяющим всем этим условиям, является вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена через точку пересечения нулевых прямых 2, 3 и *x* параллельно нулевой прямой 7 (рис. 4, б).

Две рабочие точки *G* и *K*, расположенные под нулевой прямой ведомого звена, обеспечивают в случае оборудования вспомогательного звена тормозом две передачи заднего хода. Параллельность нулевых прямых 5 и 7 дает возможность установить между ведущим звеном 0 и звеном 5 блокировочную муфту 0 $\tilde{7}$ 5. Пересечение нулевых прямых звеньев 2, 3, 5 и *x* в одной точке позволяет организовать из этих звеньев четыре планетарных ряда 325, 3*x*2, 25*x* и 3*x*5, из которых в состав кинематической схемы проектируемой коробки передач можно взять только

два. Таких вариантов сочетаний из этих четырех механизмов по два будет шесть. Все эти сочетания с добавлением к ним планетарного ряда, составленного из звеньев 2, 4 и 0, и комбинаций блокировочных муфт представлены в табл. 3.

Таблица 3

Планетарный ряд	Блокировочная муфта	Планетарный ряд	Блокировочная муфта
325; 3 <i>x</i> 2; 024	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 2	3 <i>x</i> 2; 25 <i>x</i> ; 024	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 2
	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 3		0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 4
	0 $\tilde{7}$ 5; 2 $\tilde{6}$ 3		0 $\tilde{7}$ 5; 2 $\tilde{6}$ 4
325; 25 <i>x</i> ; 024	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 2	3 <i>x</i> 2; 3 <i>x</i> 5; 024	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 2
	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 3		0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 4
	0 $\tilde{7}$ 5; 2 $\tilde{6}$ 3		0 $\tilde{7}$ 5; 2 $\tilde{6}$ 4
325; 3 <i>x</i> 5; 024	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 2	25 <i>x</i> ; 3 <i>x</i> 5; 024	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 2
	0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 3		0 $\tilde{7}$ 5; 0 $\tilde{6}$ 4
	0 $\tilde{7}$ 5; 2 $\tilde{6}$ 3		0 $\tilde{7}$ 5; 2 $\tilde{6}$ 4

Основа планов угловых скоростей, обеспечивающая семь передач переднего хода, показана на рис. 5, а. Однако следует отметить, что одна рабочая точка *G* не удовлетворяет требованию неразрывности потока мощности при переключении передач из-за чего приходится отказаться от ее использования. Таким образом, рассматриваемая основа плана угловых скоростей позволяет использовать только шесть передач, из которых четыре понижающие (точки *A*, *B*, *C* и *D*), одна прямая (точка *e*) и одна повышающая (точка *F*).

Представленная на рис. 5, а основа планов угловых скоростей позволяет организовать один планетарный ряд, состоящий из звеньев

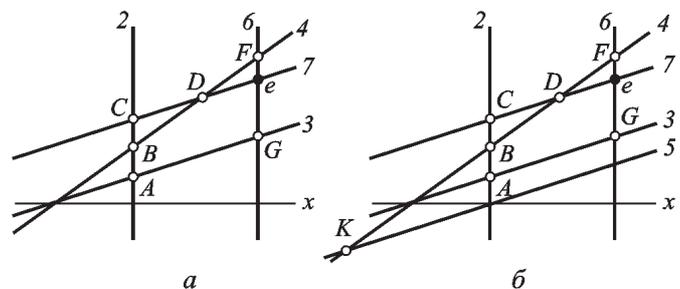


Рис. 5. Основа планов угловых скоростей № 5 (а) и вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена (б)

3, 4 и  $x$  (нулевые прямые этих звеньев пересекаются в одной точке), и две блокировочные муфты, одна из которых с условным звеном 6 должна быть установлена между звеньями 0 и 2 (нулевые прямые 2 и 6 параллельны), а вторая с условным звеном 7 между звеньями 0 и 3 (нулевые прямые 3 и 7 параллельны).

Таким образом, нулевую прямую вспомогательного звена 5 необходимо провести так, чтобы образовались два планетарных ряда причем в эти вновь образованные планетарные ряды обязательно должны войти ведущее звено 0 и звено 2. Кроме того, необходимо с помощью нулевой прямой вспомогательного звена получить рабочую точку, обеспечивающую передачу заднего хода.

Существует только один вариант проведения нулевой прямой вспомогательного звена, удовлетворяющий сформулированным выше требованиям — проведение нулевой прямой через точку пересечения нулевых прямых 2 и  $x$  параллельно нулевой прямой звена 3 (рис. 5, б).

Пересечение нулевых прямых 2, 5 и  $x$  в одной точке позволяет получить планетарный ряд, состоящий из соответствующих звеньев, а параллельность нулевых прямых 3 и 5 — образовать еще один планетарный ряд, состоящий из звеньев 3, 5 и 0. Кроме того, пересечение нулевых прямых 4 и 5 обеспечивает рабочую точку передачи заднего хода.

Две основы планов угловых скоростей, представленные на рис. 6, очень схожи между собой и отличаются только лишь расположением масштабной точки  $e$ . Однако столь небольшое отличие приводит к существенным изменениям структуры и свойств кинематической схемы разрабатываемой коробки передач.

Основа планов, приведенная на рис. 6, а, позволяет реализовать четыре понижающих передачи переднего хода (точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$ ), одну прямую (точка  $e$ ), одну повышающую (точка  $F$ ) и одну передачу заднего хода (точка  $G$ ). Наличие на основе плана угловых скоростей передачи заднего хода освобождает от необходимости оборудовать, как это было в некоторых ранее рассмотренных вариантах основы плана угловых скоростей, вспомогательное

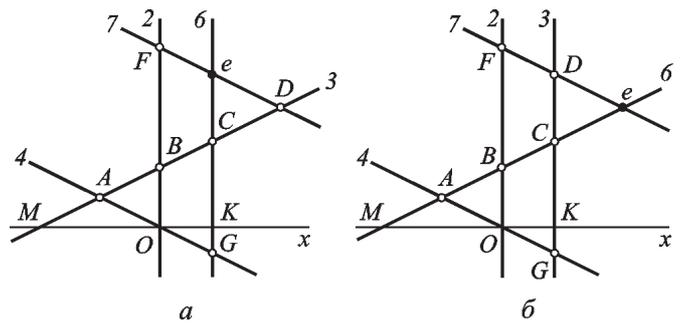


Рис. 6. Основа планов угловых скоростей № 6 (а) и № 7 (б)

звено тормозом. Это обстоятельство, во первых, упрощает конструкцию планетарной коробки передач, а, во вторых, снижает потери мощности в ней.

Расположение нулевых прямых на основе планов угловых скоростей (рис. 6, а) позволяет организовать планетарный ряд, состоящий из звеньев 2, 4 и  $x$  (определяется пересечением нулевых прямых этих звеньев в одной точке). Кроме того параллельность нулевых прямых (2 и 6) и (4 и 7) определяет наличие в составе кинематической схемы двух блокировочных муфт  $0\tilde{6}2$  и  $0\tilde{7}4$ .

Таким образом, для перехода от основы планов угловых скоростей к самому плану необходимо с помощью вспомогательного звена 5 организовать два планетарных ряда. При этом во вновь образованные планетарные ряды обязательно должны войти ведущее звено 0 и звено 3. Удовлетворяющих этому требованию способов проведения нулевой прямой вспомогательного звена существует семь вариантов (табл. 4).

Хотя основа планов угловых скоростей, представленная на рис. 6, б, очень похожа на предыдущую, но из-за иного расположения масштабной точки  $e$  коробка передач, кинематическая схема которой может быть синтезирована с помощью этой основы, будет иметь три понижающие передачи (на рис. 6, б точки  $A$ ,  $B$  и  $C$ ) одну прямую передачу (точка  $e$ ), две повышающие передачи (точки  $D$  и  $F$ ) и передачу заднего хода (точка  $G$ ). Изменение положения масштабной точки  $e$  изменило и структуру планетарных рядов и блокировочных муфт. Такая основа плана угловых скоростей определяет два планетарных ряда, в состав одного из кото-

Таблица 4

Вспомогательная прямая	Планетарный ряд	Блокировочная муфта	Вспомогательная прямая	Планетарный ряд	Блокировочная муфта
Через точку <i>B</i> параллельно прямой <i>4</i>	$24x, 045, 235$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}2$	Через точку <i>A</i> параллельно прямой <i>x</i>	$24x, 05x, 345$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}2$
Через точку <i>B</i> параллельно прямой <i>x</i>	$24x, 05x, 235$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}2$	Через точку <i>M</i> параллельно прямой <i>4</i>	$24x, 054, 35x$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}2$
Через точки <i>A</i> параллельно прямой <i>2</i>	$24x, 025, 345$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}2$	Через точку <i>O</i> параллельно прямой <i>3</i>	$24x, 25x, 035$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}2$
		$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}5$		$24x, 245, 035$	
		$0\tilde{7}4, 2\tilde{6}5$		$24x, 45x, 035$	
Через точку <i>M</i> параллельно прямой <i>2</i>	$24x, 025, 35x$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}2$		$25x, 245, 035$	
		$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}5$		$25x, 45x, 035$	
		$0\tilde{7}4, 2\tilde{6}5$		$245, 45x, 035$	

рых должны войти звенья *2*, *4* и *x* (их нулевые прямые пересекаются в одной точке), а второй составят звенья *0*, *2* и *3* (нулевые прямые звеньев *2* и *3* параллельны). Кроме того, параллельность нулевых прямых *4* и *7* определяет наличие в кинематической схеме блокировочной муфты  $0\tilde{7}4$ . Таким образом, для построения

плана угловых скоростей необходимо с помощью нулевой прямой вспомогательного звена *5* организовать один планетарный ряд и блокировочную муфту с условным звеном *6*.

Существует 12 вариантов проведения нулевой прямой, удовлетворяющих данному условию (табл. 5).

Таблица 5

Вспомогательная прямая	Планетарный ряд	Блокировочная муфта	Вспомогательная прямая	Планетарный ряд	Блокировочная муфта	
Через точку <i>C</i> параллельно прямой <i>4</i>	$24x, 023, 045$	$0\tilde{7}4, 3\tilde{6}5$	Через точку <i>A</i> параллельно прямой <i>x</i>	$24x, 023, 05x$	$0\tilde{7}4, 4\tilde{6}5$	
Через точку <i>C</i> параллельно прямой <i>x</i>	$24x, 023, 05x$	$0\tilde{7}4, 3\tilde{6}5$	Через точку <i>M</i> параллельно прямой <i>4</i>	$24x, 023, 045$	$0\tilde{7}4, 5\tilde{6}5x$	
Через точку <i>B</i> параллельно прямой <i>4</i>	$24x, 023, 045$	$0\tilde{7}4, 2\tilde{6}5$	Через точку <i>M</i> параллельно прямой <i>2</i>	$24x, 023, 025$	$0\tilde{7}4, 5\tilde{6}5x$	
Через точку <i>B</i> параллельно прямой <i>x</i>	$24x, 023, 05x$	$0\tilde{7}4, 2\tilde{6}5$		$24x, 023, 035$		
Через точку <i>A</i> параллельно прямой <i>2</i>	$24x, 023, 025$	$0\tilde{7}4, 4\tilde{6}5$		$24x, 023, 235$		
	$24x, 023, 035$			$24x, 025, 035$		
	$24x, 023, 235$			$24x, 025, 235$		
	$24x, 025, 035$			$24x, 035, 235$		
	$24x, 025, 235$		$24x, 035, 235$			
Через точку <i>K</i> параллельно прямой <i>6</i>	$24x, 023, 35x$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}5$	Через точку <i>O</i> параллельно прямой <i>6</i>	$24x, 25x, 035$	$0\tilde{7}4, 0\tilde{6}5$	
Через точки <i>C</i> и <i>O</i>	$24x, 25x, 035$	$0\tilde{7}4, 3\tilde{6}5$		$24x, 245, 035$		$24x, 245, 035$
	$24x, 45x, 035$			$24x, 45x, 035$		
	$25x, 245, 035$			$25x, 45x, 035$		
	$25x, 45x, 035$		$245, 45x, 035$			
	$245, 45x, 035$		Через точки <i>B</i> и <i>K</i>	$24x, 023, 35x$	$0\tilde{7}4, 2\tilde{6}5$	

Полученные основы планов угловых скоростей трехступенных планетарных коробок передач позволяют синтезировать коробки с шестью передачами переднего хода. В дальнейшем для каждого из найденных вариантов сочетания планетарных рядов и блокировочных муфт необходимо распределить функции между звеньями, входящими в состав каждого планетарного ряда, определить внутренние передаточные отношения каждого планетарного ряда и построить кинематические схемы.

## Литература

- [1] Харитонов С.А. *Автоматические коробки передач*. Москва, Астрель-АСТ, 2003. 335 с.
- [2] Харитонов С.А., Нагайцев М.В., Юдин Е.Г. *Автоматические коробки передач современных легковых автомобилей*. Москва, Легион-Автodata, 2000. 125 с.
- [3] Christoph Dorr. The new automatic transmission 9G-tronic from Mercedes-Benz. *12<sup>th</sup> International symposium automotive transmissions, HEV and EV drivers*. Germany, 2013.
- [4] Naunheimer H., Bertsche B., Ryborz J., Novak W. *Automotive Transmissions. Fundamentals, Selection, Design and Application*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer, 2011. 715 p.
- [5] Нагайцев М.В., Харитонов С.А., Юдин Е.Г. *Автоматические коробки передач современных легковых автомобилей*. Москва, Легион-Автodata, 2000. 125 с.
- [6] *Design practices: Passenger car automatic transmission*. SAE International. Warrendale, Pennsylvania, 2012. 1020 p.
- [7] Красненьков В.И., Вашец А.Д. *Проектирование планетарных механизмов транспортных машин*. Москва, Машиностроение, 1986. 273 с.
- [8] Шеломов В.Б. *Теория взаимного пространственного расположения элементов планетарных передач на основе инвариантных свойств их обобщенных структур*. Дисс. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2006. 249 с.

## References

- [1] Kharitonov S.A. *Avtomaticheskie korobki peredach* [Automatic Transmission]. Moscow, Astrel'-AST publ., 2003. 335 p.
- [2] Kharitonov S.A., Nagaitsev M.V., Iudin E.G. *Avtomaticheskie korobki peredach sovremennykh legkovykh avtomobilei* [Automatic transmissions in modern passenger cars]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2000. 125 p.
- [3] Christoph Dorr. The new automatic transmission 9G-tronic from Mercedes-Benz. *12<sup>th</sup> International symposium automotive transmissions, HEV and EV drivers*, Germany. 2013.
- [4] Naunheimer H., Bertsche B., Ryborz J., Novak W. *Automotive Transmissions. Fundamentals, Selection, Design and Application*. Second Edition, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, Springer, 2011. 715 p.
- [5] Nagaitsev M.V., Kharitonov S.A., Iudin E.G. *Avtomaticheskie korobki peredach sovremennykh legkovykh avtomobilei* [Automatic transmissions in modern passenger cars]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2000. 125 p.
- [6] *Design practices: Passenger car automatic transmission*. Fourth edition. SAE International. Warrendale, Pennsylvania, 2012. 1020 p.
- [7] Krasnen'kov V.I., Vashets A.D. *Proektirovanie planetarnykh mekhanizmov transportnykh mashin* [Designing planetary mechanisms of transport vehicles]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 273 p.
- [8] Shelomov V.B. *Teoriia vzaimnogo prostranstvennogo raspolozheniia elementov planetarnykh peredach na osnove invariantnykh svoystv ikh obobshchennykh struktur*. Diss. dokt. tekhn. nauk [The theory of mutual spatial arrangement of the elements of the planetary gear based on invariant properties of generalized structures. Dr. tech. sci. diss.]. Sankt-Peterburg, 2006. 249 p.

Статья поступила в редакцию 10.01.2014

## Информация об авторах

**ХАРИТОНОВ Сергей Александрович** (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Гусеничные машины и мобильные роботы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: sintespkp@yandex.ru).

**НАГАЙЦЕВ Максим Валерьевич** (Москва) — кандидат технических наук, доцент, генеральный директор НПО ФГУП «НАМИ» (125438, Москва, Российская Федерация, Автомоторная ул., д. 2, e-mail: ngmax@yandex.ru).

## Information about the authors

**KHARITONOV Sergey Aleksandrovich** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Tracked vehicles and mobile robots» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: sintespkp@yandex.ru).

**NAGAYTSEV Maksim Valer'ev** (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Director General of Federal State Unitary Enterprise «Central Scientific Research Automobile and Engine Institute» (NAMI, Automotornaya str., 2, 125438, Moscow, Russian Federation, e-mail: ngmax@yandex.ru).