

## Снижение динамической нагруженности элементов в контуре циркуляции мощности планетарной коробки передач автомобиля

Разработаны рекомендации по снижению динамической нагруженности элементов в контуре циркуляции мощности планетарной коробки передач автомобиля путем увеличения времени регулирования давления в гидроцилиндре включаемого фрикционного тормоза и дополнительного кратковременного подключения фрикционных из числа не включаемых при работе передачи заднего хода. Рекомендованная характеристика изменения давления в гидроцилиндре включаемого фрикциона на передаче заднего хода позволила снизить динамические нагрузки на 14 % в элементах коробки передач БелАЗ-7516.

**Ключевые слова:** динамическая нагруженность, планетарная коробка передач, динамическая модель, циркуляция мощности, регулирование давления, программное обеспечение SMM Model.

The guidelines have been elaborated to reduce the dynamic loading of elements in the contour of circulation of power of the motor car planetary gear box by increasing the control time of pressure in the hydraulic cylinder of switched-on friction brake and an additional short-term switching the frictions from the numbers of non-switched ones at working of the reverse gear. Recommended characteristic of the pressure change in the hydraulic cylinder of switched-on friction on the reverse gear allows reduce the dynamic loads in the elements of the gearbox BelAZ-7516 motor car by 14 %.

**Keywords:** dynamic loading, planetary gearbox, dynamic model, circulation of power, pressure control, MM Model software.

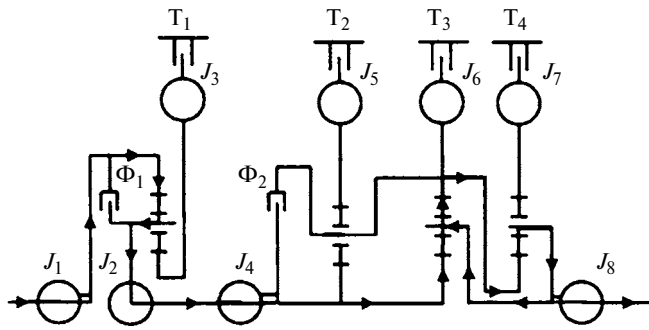
Актуальность проведения исследований циркуляции мощности в планетарных коробках передач (ПКП) автомобиля и разработки на их основе ре-

комендаций по снижению динамической нагруженности в элементах ПКП объясняется тем, что снижение динамической нагруженности позволяет повысить надежность и ресурс всей трансмиссии. При этом необходимо отметить, что во многих ПКП, в том числе и зарубежных, таких как Caterpillar и Allison, при работе передачи заднего хода имеет место циркуляция мощности, что допускается, так как относительный пробег автомобиля на передачах заднего хода невелик (не превышает 3 % от его общего пробега [1]). Однако в определенных условиях может возникнуть (и возникает) необходимость продолжительного движения автомобиля задним ходом или частого включения и выключения передачи заднего хода.

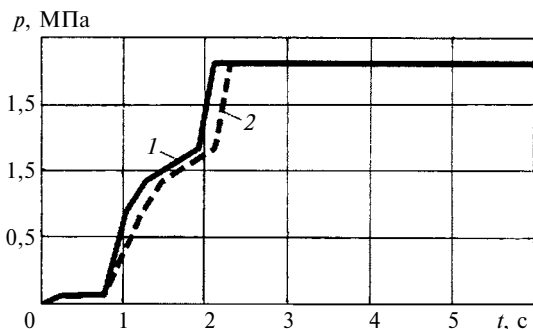
Разработка рекомендаций по снижению динамической нагруженности в элементах ПКП заключалась в изменении характеристики регулирования давления в гидроцилиндре включаемого фрикциона и дополнительном подключении фрикционных элементов из числа не включаемых при работе передачи заднего хода.

### Увеличение времени регулирования давления в гидроцилиндре фрикционного тормоза, включаемого на передаче заднего хода

Рассмотрим схему (рис. 1) циркуляции мощности в планетарной коробке передач карьерного самосвала БелАЗ-7516 на передаче заднего хода при включении фрикционного тормоза  $T_4$  (тормоз  $T_1$



**Рис. 1. Схема циркуляции мощности на передаче заднего хода:**  
 $J_1 \div J_8$  — моменты инерции сосредоточенных масс;  $\Phi_1, \Phi_2$  — фрикционные муфты;  $T_1 \div T_4$  — фрикционные тормоза



**Рис. 2. Исходная 1 и предлагаемая 2 характеристики изменения давления в гидроцилиндре фрикционного тормоза  $T_4$**

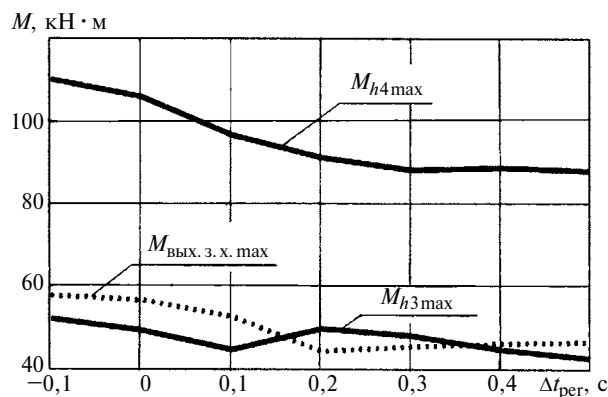
включен на нейтрали). Для построения динамической модели трансмиссии автомобиля использовали программное обеспечение SMM Model [2].

Время регулирования давления в исполнительном гидроцилиндре (рис. 2) включаемого фрикционного тормоза  $T_4$  определяет скорость нарастания давления и время включения передачи заднего хода. Увеличение времени регулирования снижает скорость нарастания давления и увеличивает время включения передачи, а следовательно, момент трения фрикционного тормоза нарастает более плавно, что снижает динамические нагрузки в элементах ПКП, так как создаваемый тормозом реактивный момент определяет величину динамических нагрузок. Как известно, мощность определяется как произведение скоростного и силового факторов. Если динамические нагрузки будут невелики, то основное влияние на скалярную величину мощности будет оказывать скоростной фактор, трансформация которого не зависит от циркуляции мощности [3]. Кроме того, при плавном включении фрикционного тормоза возрастает время буксования фрикциона и тем самым увеличивается количество мощности, преобразуемой в теплоту, и, таким образом, снижается мощность, циркулирующая в контуре, а следовательно, уменьшаются динамические нагрузки. Увеличение времени буксова-

ния фрикционного тормоза  $T_4$  не вызовет перегрева фрикционных дисков (превышения допустимых удельных мощности и работы буксования), так как начальная угловая скорость элемента с моментом инерции  $J_7$  невелика ( $\omega_7 = 11,791$  рад/с).

На рис. 3 представлены изменения максимальных амплитуд моментов на водилах третьего ( $M_{h3max}$ ) и четвертого ( $M_{h4max}$ ) планетарных рядов и момента  $M_{\text{вых.з.х. max}}$  на выходном валу ПКП в зависимости от приращения  $\Delta t_{\text{рег}}$  времени регулирования давления в исполнительном гидроцилиндре фрикционного тормоза  $T_4$ . Из анализа рис. 3 следует, что приращение  $\Delta t_{\text{рег}}$  времени регулирования не должно превышать 0,2 с. При дальнейшем увеличении  $\Delta t_{\text{рег}}$  существенного снижения динамических нагрузок в контуре циркуляции не наблюдается. Это связано с тем, что при плавном нарастании момента трения элемент с моментом инерции  $J_7$  (см. рис. 1) начинает быстро разгоняться. Кроме того, увеличивается время буксования фрикциона  $T_4$ , а следовательно, время включения передачи заднего хода.

Предлагаемая характеристика изменения давления в гидроцилиндре фрикционного тормоза  $T_4$  для снижения динамических нагрузок в контуре циркуляции мощности приведена на рис. 2. Она позволяет снизить динамические нагрузки на водиле четвертого планетарного ряда на 14 %. При этом время буксования фрикциона  $T_4$  возрастет на 0,33 с и составит 1,34 с, а максимальное значение амплитуды ускорения автомобиля снизится на 27 %. Максимальные удельные мощность и работа буксования фрикциона не превышают предельно допустимых значений и составляют:  $P_{T4\text{уд. max}} = 299$  Вт/м<sup>2</sup> (допустимая удельная мощность буксования согласно рекомендациям работы [4] равна 1500 кВт/м<sup>2</sup>);  $W_{T4\text{уд. max}} = 140,8$  кДж/м<sup>2</sup>. Улучшение показателей динамической нагруженности на выходном ва-



**Рис. 3. Изменения максимальных амплитуд моментов в зависимости от приращения времени регулирования давления в гидроприводе фрикционного тормоза, включаемого на передаче заднего хода**

лу ПКП на 14 % приводит к ухудшению показателей тепловой динамики фрикциона  $T_4$  на 32,7 %. Учитывая, что фрикцион включается только на передаче заднего хода, время работы на которой по сравнению с остальными передачами невелико ( $\approx 2,5$  % от общего пробега автомобиля [1]), фрикцион  $T_4$  имеет большой запас ресурса и увеличение времени буксования не представляет опасности. В то же время выходной вал ПКП участвует в передаче потока мощности на всех передачах и именно при трогании автомобиля с места воспринимает большие динамические нагрузки, снижение которых значительно уменьшит накапливаемые усталостные повреждения.

#### Кратковременная подача давления в гидроцилиндр фрикциона из числа не включаемых на передаче заднего хода

Один из предлагаемых способов снижения динамических нагрузок в контуре циркуляции мощности ПКП во время переходного процесса — отвод части потока мощности на планетарные ряды ПКП, не участвующие в трансформации параметров мощности, и преобразование части мощности в теплоту путем подключения дополнительных фрикционов, не используемых на передаче заднего хода. В работе [5] данный способ рекомендован для снижения нагруженности фрикционов ПКП.

При работающей передаче заднего хода второй планетарный ряд ПКП не участвует в трансформации потока мощности, так как динамические нагрузки и мощности на его элементах на порядок ниже, чем на остальных элементах ПКП. Следовательно, часть мощности во время переходного процесса можно направить на этот планетарный ряд путем кратковременного включения фрикционной муфты  $\Phi_2$  или фрикционного тормоза  $T_2$  (см. рис. 1). При этом давление в гидроцилиндре кратковременно подключаемого фрикционного элемента должно достигать максимального значения приблизительно в момент включения передачи, когда динамические нагрузки начинают стремительно возрастать. Максимально допустимое давление необходимо выбирать с учетом недопущения включения фрикционного элемента.

Кратковременная подача давления, во-первых, позволяет часть мощности преобразовать в теплоту, а во-вторых, приводит к тому, что часть мощности пойдет на увеличение динамической нагруженности элементов ПКП, которые не входят в контур циркуляции мощности. Таким образом, во время переходного процесса можно уменьшить мощность, подводимую к контуру циркуляции, а следовательно, снизить динамические нагрузки, возникающие в элементах третьего и четвертого

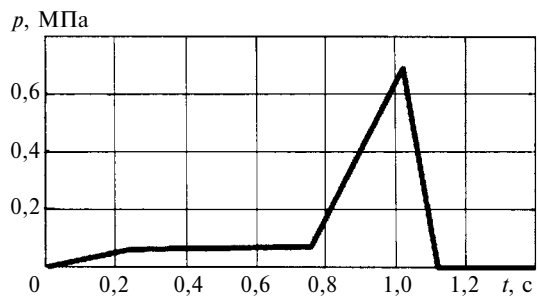


Рис. 4. Изменение во времени давления в гидроцилиндре кратковременно подключаемого фрикционного элемента

планетарных рядов. График изменения давления в кратковременно включаемом фрикционе приведен на рис. 4. Результаты моделирования дополнительного подключения неиспользуемых фрикционов на передаче заднего хода приведены в таблице, анализ которой позволил сделать следующие выводы.

1. Подключение дополнительных фрикционов ухудшает показатели динамичности автомобиля, так как часть мощности расходуется на выполнение работы буксования кратковременно подключаемого фрикциона.

2. Мощности и работы буксования подключаемых фрикционов не превышают установленных ограничений.

3. Не рекомендуется подключать одновременно два и более дополнительных фрикционов из-за существенного ухудшения показателей динамичности автомобиля и усложнения системы управления.

4. Подключение фрикциона  $\Phi_1$  незначительно улучшает показатели динамической нагруженности (в частности, максимальная амплитуда момента  $M_{h4max}$  снизилась на 7,4 %) и поэтому его дополнительное подключение не имеет смысла.

5. Подключение тормоза  $T_2$  позволяет направить поток мощности на второй планетарный ряд (не участвующий в трансформации параметров потока мощности на передаче заднего хода) и, таким образом, снизить  $M_{h4max}$  на 18,6 %, обеспечивая момент на выходе ПКП таким же, как и при дополнительном подключении тормоза  $T_3$ . Однако вследствие небольшого числа (всего четыре) пар трения удельная мощность буксования фрикционных дисков весьма велика и при резком трогании автомобиля может достигнуть предельного значения. Поэтому применение фрикциона  $T_2$  без снижения его ресурса для дополнительного подключения на передаче заднего хода требует увеличения числа пар трения. При этом необходимо обеспечить плановое включение ступеней, на которых этот фрикцион используется в качестве рабочего элемента управления, что может вызвать определенные проблемы для изменения характеристик регулирования давлений и системы управления.

### Оценочные показатели

Кратковременно подключаемый фрикцион	Значения показателей																				
	плавности и динамичности движения автомобиля		динамической нагруженности				теплонпряженности														
	$a_{\max}, \text{ м/с}^2$	$M_{\text{вых. макс}}, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$M_{h1\max}$	$M_{h2\max}$	$M_{h3\max}$	$M_{h4\max}$	$P_{\text{уд. макс}}, \text{ кВт/м}^2$					$W_{\text{уд. макс}}, \text{ кДж/м}^2$					$t_6, \text{ с}$				
			Н · м				Фрикцион														
						$\Phi_1$	$\Phi_2$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$\Phi_1$	$\Phi_2$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	
$\Phi_1$	2,687	-51553	13877	-914,16	47515	-99068	293	—	—	—	180,6	79,6	—	—	—	52,5	1,12	—	—	—	0,97
$\Phi_2$	1,963	-40194	17724	-1277	43285	-81767	—	716,6	—	—	177,2	—	209,2	—	—	51,8	—	1,12	—	—	0,98
$T_2$	2,305	-45134	16743	7450	48159	-87067	—	—	1169	—	206	—	—	293,6	—	62	—	—	1,12	—	1,02
$T_3$	2,26	-45516	17241	-1059	57035	-90394	—	—	—	489	268,5	—	—	—	124,2	81	—	—	—	1,12	1,05
Без дополнительно подключаемого фрикциона	2,99	-56319	14707	-939,7	50661	-106976	—	—	—	—	195,5	—	—	—	—	59,4	—	—	—	—	1,01

Примечание.  $P_{\text{уд. макс}}$ ,  $W_{\text{уд. макс}}$ ,  $a_{\max}$  — максимальные значения: удельных мощности и работы буксования фрикционов, амплитуды ускорения автомобиля;  $t_6$  — время буксования элементов управления.

6. Подключение фрикциона  $T_3$  равноценно приложению внешнего сопротивления к элементу с моментом инерции  $J_6$  (см. рис. 1), расположенному в контуре циркуляции мощности, и приводит к уменьшению максимальной амплитуды момента  $M_{h4\max}$  на 15,5 % путем распределения части мощности, идущей к четвертому ряду, между первым и третьим планетарными рядами.

7. Для использования в качестве дополнительно подключаемого фрикциона наиболее благоприятна фрикционная муфта  $\Phi_2$ , подключение которой позволяет снизить  $M_{h4\max}$  на 23,6 %, а  $M_{h3\max}$  на 14,6 % путем увеличения подвода мощности к первому и второму планетарным рядам и выполнения работы буксования фрикциона. Кроме того, это позволяет снизить работу буксования фрикциона  $T_4$  на 9,6 %. Снижение показателей динамичности движения автомобиля на 34,3 % повысит показатели плавности движения, так как максимальные амплитуды ускорений автомобиля будут ниже, а движение на высоких скоростях задним ходом не характерно для таких автомобилей, как карьерные самосвалы (например, для БелАЗ-7516).

### Заключение

Результаты моделирования процесса трогания с места автомобиля БелАЗ-7516 показали, что циркуляция мощности оказывает существенное влияние на качество протекания переходного процесса в звеньях ПКП.

Практическая ценность и новизна полученных результатов заключаются в разработке рекомендаций по снижению динамических нагрузок на треть-

ем и четвертом планетарных рядах ПКП (см. рис. 1) путем увеличения времени регулирования давления на 0,2 с в гидроцилиндре фрикционного тормоза  $T_4$ , что позволяет снизить  $M_{h4\max}$  на 14 %, а путем дополнительного подключения фрикционной муфты  $\Phi_2$  — на 23,6 %. Разработанные рекомендации использованы при проектировании конструкции гидромеханической передачи карьерного самосвала БелАЗ-7516.

На основе полученных результатов сформулированы следующие рекомендательные требования к ПКП:

1. При наличии в кинематической схеме ПКП замкнутых контуров необходимо проверить циркуляцию мощности.

2. Если при работе передачи заднего хода имеется циркуляция мощности, то желательно, чтобы элементы планетарных рядов, входящие в контур циркуляции и воспринимающие наибольшие динамические нагрузки, не участвовали в преобразовании параметров потока мощности при работе остальных передач. Например, наибольшие динамические нагрузки в ПКП БелАЗ-7516 по силовому фактору возникают в элементах четвертого планетарного ряда. Этот ряд участвует в трансформации параметров потока мощности только при работе передачи заднего хода и не участвует в преобразовании параметров потока мощности при работе передач переднего хода.

3. Для транспортных средств, основным режимом работы которых является движение "вперед—назад", использование ПКП с циркуляцией мощности при работе передачи заднего хода нежелательно.