

**ДВУХПОТОЧНАЯ ТРАНСМИССИЯ НА ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИНАХ
КАК АЛЬТЕРНАТИВА КЛИНОРЕМЕННОМУ ВАРИАТОРУ**

Кандидат техн. наук **Репецкий Д.С.**, кандидат техн. наук **Мальцев Д.В.**
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

**USE OF DUAL-FLOW TRANSMISSION ON SPECIAL VEHICLES AS AN ALTERNATIVE
TO A V-BELT VARIATOR**

D.S. Repetsky, Ph.D. (Tech.), D.V. Maltsev, Ph.D. (Tech.)
(Perm National Research Polytechnic University)

Бесступенчатая трансмиссия, вариатор, двухпоточная трансмиссия.

Continuously variable transmission, CVT, dual-flow transmission.

Статья посвящена анализу возможности применения двухпоточных бесступенчатых трансмиссий на специальной технике для последующей автоматизации и роботизации этой техники. Рассмотрены характеристики бесступенчатых автоматических трансмиссий, указаны характерные проблемы, возникающие в процессе эксплуатации. Определены основные недостатки трансмиссий с клиноременными вариаторами. В качестве прототипа рассмотрена конструкция трансмиссии легкового автомобиля, выявлены ее достоинства и недостатки. Определена общая концепция схемы двухпоточной трансмиссии.

The article is devoted to the analysis of the possibility of using dual-flow continuously variable transmissions on special equipment for subsequent automation and robotization of this equipment. Characteristics of stepless automatic transmissions are considered, characteristic problems arising in the course of operation are specified. The main disadvantages of transmissions with V-belt variators are determined. As a prototype, the design of the passenger car transmission is considered, its advantages and disadvantages are revealed. The General concept of the two-stream transmission scheme is defined.

В настоящее время актуальными являются вопросы автоматизации и роботизации транспортно-технологических машин (ТТМ), в том числе за счет использования автоматических трансмиссий. Использование гидростатических трансмиссий возможно на легковых и грузовых автомобилях, в автобусах, а также промышленных тракторах, специальных машинах, в том числе гусеничных [1].

Конструкция трансмиссии определяет целый ряд технических характеристик, в том числе плавность хода ТТМ, наряду с настройками подвески. Требования к плавности хода и к топливной экономичности являются приоритетными и лежат в основе концепции производства ТТМ. Это подтверждается стремительным ростом парка ТТМ, оснащенных бесступенчатыми трансмиссиями, например, таких производителей как Caterpillar, Komatsu, Liebherr, Shantui. Роботизация техники практически невозможна без применения автоматических трансмиссий, кроме того автоматические бесступенчатые трансмиссии существенно увеличивают плавность хода, что актуально, в том числе для военных машин, т.к. сокращает время на стабилизацию и прицеливание бортового орудия на ходу [2].

Современные средства электронного управления способны обеспечить плавное изменение передаточного отношения, без разрыва силового потока. Поддержание оборотов двигателя на пиковых значения крутящего момента и мощности позволяет оптимальным образом адаптировать эксплуатационные характеристики двигателя под конкретный режим движения ТТМ.

Помимо топливной экономичности и плавности хода, к элементам трансмиссии ТТМ предъявляется ряд иных требований: производительность, безопасность, надежность, снижение совокупных затрат на производство, обслуживание и эксплуатацию; соблюдение норм, регламентированных законодательством и соответствующими стандартами [2].

Надежность современной отечественной техники, а также отдельных узлов и агрегатов остается на невысоком уровне. По оценке экспертов затраты на техническое обслуживание (ТО) и ремонт отечественного автомобиля составляют 300-500% от его первоначальной стоимости, что в 3-4 раза выше, чем в развитых странах [3-4]. Данный факт является следствием несоблюдения технологий ТО и ремонта, отсутствие необходимого оборудования, оснастки и инструмента, а также продолжительными простоями в ремонте, преимущественно из-за отсутствия запасных частей.

При выполнении строительных и сельскохозяйственных работ ТТМ эксплуатируется в тяжелых условиях, что закономерно приводит к большому количеству отказов [5-7]. Учитывая сезонный характер строительных, сельскохозяйственных работ, любые простои техники в ремонте приводят к значительной потере прибыли предприятия. Также необходимо учитывать недостаточную материально-техническую базу предприятий и не всегда квалифицированный персонал. Проблемы, связанные с нарушением технологической дисциплины при ТО и ТР, недостаточной мотивацией и компетентностью персонала подробно рассмотрены в работе [8].

Наиболее популярным видом бесступенчатой трансмиссии ТТМ являются клиноременные и цепные вариаторы. Крутящий момент в вариаторах передается с помощью ремня или цепи, а передаточное отношение изменяется одновременной раздвижкой-сдвижкой шкивов ремня (цепи) с изменением диаметра шкивов [9-11].

Однако, несмотря на очевидный прогресс в технологиях производства, показатели характеристик ресурса и ремонтпригодности агрегата невысоки. Опираясь на опыт эксплуатации можно сказать, что ресурс вариаторов зачастую не превышает даже 100 тыс. км пробега [2]. При этом КПД клиноременного вариатора находится в диапазоне 85-90% [2], что уступает значениям серийных образцов ступенчатых коробок передач. Так же одним из минусов вариатора является ограничение в применении на двигателях с высокой мощностью, т.к. эксплуатация будет сопровождаться повышенным износом в зонах трения вследствие неизбежного проскальзывания передающих звеньев механизма. Как правило, в современной практике вариатор устанавливается на легковые автомобили с заявленным максимальным крутящим моментом до 350 Нм.

Альтернативным решением бесступенчатых трансмиссий является применение двух- и многопоточных трансмиссий. Однако, вопрос о целесообразности применения двух- и многопоточной трансмиссии в негибридных системах слабо изучен. Целью данной статьи является определение основных факторов (эксплуатационных характеристик), способных определить перспективы развития двухпоточных автомобильных трансмиссий.

В качестве примера выбрана трансмиссия Тойота Приус. Данная модель достаточно популярна, в общей сложности произведено более 3,5 млн автомобилей этой модели [12]. Основным элементом трансмиссии (Рис. 1) является дифференциал планетарного типа, к солнечной шестерне которого подсоединен ротор генератор-мотора, через полый вал ротора проходит вал ДВС, соединенный с водилом дифференциала.

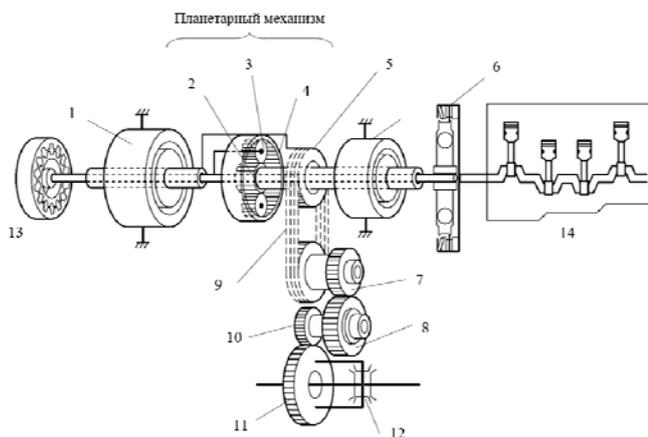


Рис. 1. Схема трансмиссии автомобиля Тойота

- 1 - MG2, 2 - солнечное колесо, 3 - спутник, 4 - коронное колесо, 5 - звездочка цепной передачи, 6 - MG1, 7 - ведущая шестерня, 8 - ведомая шестерня, 9 - цепь, 10 - шестерня главной передачи, 11 - зубчатое колесо главной передачи, 12 - дифференциал, 13 - масляный насос, 14 - ДВС.

С коронного колеса дифференциала отбирается крутящий момент к ведущим колесам автомобиля. С дифференциалом через его понижающую передачу соединен электродвигатель.

При статичном положении ТТМ двигатель работает, коронное колесо остановлено, водило вращается с той же скоростью, что и коленчатый вал двигателя, а солнечное колесо вместе с ротором генератор – мотора вращается с большей скоростью в ту же сторону, что и двигатель. Если ТТМ начинает движение, генератор – мотор начинает вырабатывать электрическую мощность, а электродвигатель эту мощность потребляет и отдает на ведущие колеса через редуктор, передачу и главную передачу. На малой скорости почти весь крутящий момент от двигателя передается через электрическую передачу "генератор-электродвигатель", так же, как и в полнопоточной электрической передаче. Но с ростом скорости ТТМ часть крутящего момента передается от водила дифференциала к коронному колесу, минуя электрическую передачу. И доля эта увеличивается вместе с ростом скорости. По мере разгона ТТМ ротор генератора замедляется, а ротор электродвигателя наоборот, ускоряется. В определенный момент времени ротор генератора останавливается совсем, и генератор прекращает вырабатывать электрический ток. Он становится избыточным – весь крутящий момент ДВС передается через планетарный дифференциал к колесам или гусеницам ТТМ. Этот режим принято называть "механической точкой", КПД трансмиссии в нем достигает максимума. Передаточное отношение трансмиссии можно уменьшать и дальше, продолжая разгонять ТТМ за "механическую точку". В этом случае электродвигатель и генератор меняются функциями: энергия вырабатывается электродвигателем и потребляется генератором 3, который начинает вращаться в противоположную сторону. Этот режим называют "циркуляцией мощности"; КПД трансмиссии в нем начинает снова падать [2].

Основным минусом данной системы является дорогостоящие никель – металлгидридная батарея емкостью от 6 до 15 Ач и напряжением 288 до 345 В в зависимости от года выпуска [2], а также блок управления гибридной трансмиссией, интегрированный с системой преобразования электроэнергии. Это сказывается на конечной стоимости транспортного средства и ограничивает спрос.

Возможна разработка упрощенной модели двухпоточной трансмиссии, за счет исключения из конструкции батареи. Генератор будет постоянно «питать» электромотор, а передаточное отношение будет изменяться за счет изменения токовой нагрузки на генераторе, тем самым регулируя передаваемый крутящий момент на движители (Рис. 2).

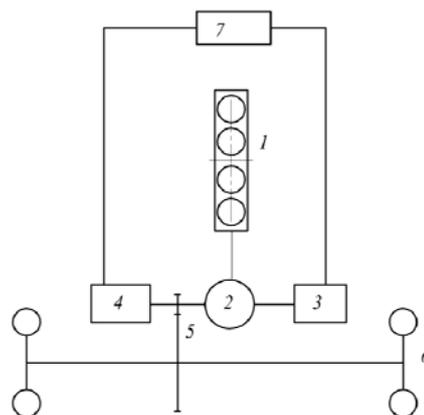


Рис. 2. Схема упрощенной двухпоточной трансмиссии

- 1 - ДВС, 2 - дифференциал, 3 - генератор, 4 - электромотор, 5 - главная передача, 6 - движители, 7 - блок управления.

В отличие от исходной трансмиссии отсутствует режим «экстренного ускорения», когда действуют оба электромотора и дифференциал работает на сложение крутящих моментов. При этом отсутствует режим рекуперации, когда энергия от торможения преобразуется из механической в электрическую, накапливаясь в аккумуляторе, что снизит КПД.

Очевидно, что наличие дифференциала в конструкции делает коэффициент полезного действия непостоянным. В рамках настоящего исследования возможно оценить минимальное и максимальное значения коэффициента полезного действия, но для этого в первом приближении необходимо определить конкретный состав узлов схемы. Так, принимаем, что в схеме используется планетарный цилиндрический дифференциал без трения, с КПД $\mu_{\text{дифф}} = 0,98$. А также считаем, что будут использованы обратимые асинхронные машины (поз. 3 и 4 на рис. 2), коэффициент полезного действия которых равен $\mu_{\text{асхм}} = 0,9$. Учитывая сопротивление электрических проводов и электронных компонентов блока управления (поз. 7 на рис. 2), принимаем КПД проводов равным $\mu_{\text{пр}} = 0,99$, а КПД блока управления – $\mu_{\text{эбу}} = 0,9$ (большое рассеивание тепловой энергии дает транзисторный блок). Минимальный суммарный коэффициент полезного действия будет наблюдаться в режиме трогания автомобиля с места: колеса автомобиля остановлены; тяговое усилие создается электродвигателем (поз.4 на рис.2), при этом энергия идет от генератора (поз.3 на рис.2) с потерями:

$$\sum \text{КПД} = \mu_{\text{дифф}} \cdot \mu_{\text{асхм}} \cdot \mu_{\text{пр}} \cdot \mu_{\text{эбу}} = 0,72.$$

Таким образом, минимальный ожидаемый КПД исследуемой двухпоточной трансмиссии – 72%.

Максимальный расчетный КПД следует ожидать в т.н. «механической точке» - этот режим возможен только во время движения – когда поток энергии прекращает идти через генератор на электродвигатель, но вся энергия следует через дифференциал на колеса транспортного средства. Расчетное ожидаемое КПД на данном режиме приравнивается КПД планетарного механизма дифференциала – 0,98.

Таким образом, ожидаемый максимальный КПД исследуемой двухпоточной трансмиссии – 98%.

Данная система проигрывает клиноременному вариатору в энергоэффективности на некоторых режимах, но в то же время может и превзойти его. Также двухпоточная бесступенчатая трансмиссия прогнозируемо обладает лучшими ресурсными характеристиками и безотказностью, поскольку в элементах этой трансмиссии износ минимален и обусловлен, в основном, трением, сопровождающим рабочий процесс зубчатых передач. Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1) Использование автоматических трансмиссий на строительной и сельскохозяйственной технике является перспективным.

2) Применение клиноременных вариаторов на строительной и сельскохозяйственной технике является нецелесообразным из-за их невысоких характеристик ремонтпригодности и ресурса.

3) Наиболее перспективными являются двухступенчатые трансмиссии, их КПД находится в диапазоне от 0,72 до 0,98.

4) Моделирование и проектирование бесступенчатых двухпоточных трансмиссий является важной ступенью создания промышленных образцов. Учитывая расту-

щую потребность в улучшении показателей плавности хода транспортных машин различного назначения, бесступенчатая двухпоточная трансмиссия имеет перспективы массового применения.

Литература

1. Кондаков С.В. Автоматическое управление движением гусеничной машины с интеллектуальной гидростатической трансмиссией при целеуказании в координатах GPS / С.В. Кондаков, Н.В. Дубровский // Тракторы и сельхозмашины. - 2018. - № 2. - С. 34-40.
2. Попов А.В., Козырин Н.С., Мальцев Д.В. Двухпоточная трансмиссия против вариатора // Автомобильная промышленность. - 2018. - №11. - с. 18-21.
3. Шаихов Р.Ф. Определение остаточного ресурса деталей навесного оборудования специальных автомобилей/ Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. Изд-во ПНИПУ. - 2019, № 3. - с. 83-88.
4. Мальцев Д.В., Пестриков С.А. Определение оптимальной периодичности технического обслуживания автобусов//Мир транспорта. -2018. -№2 (75). -С. 96-105.
5. Шаихов Р.Ф. Особенности эксплуатации автомобилей с турбокомпрессорами в условиях карьеров/ Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. Изд-во ПНИПУ. - 2019, № 2. - с. 73-79.
6. Мальцев Д.В. Анализ причин малой наработки на отказ турбокомпрессоров при эксплуатации в условиях карьеров//Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика/Воронеж. гос. лесотехн. ун-т им. Г.Ф. Морозова. -2016. -Т. 4, № 5-4 (25-4). -С. 267-271.
7. Мальцев Д.В. Совершенствование организации перевозочного процесса твердых бытовых отходов автомобильным транспортом: дис... канд. техн. наук: спец. 05.22.10/Д.В. Мальцев. -Орел, 2016. -142 с.
8. Шаихов Р.Ф. Контроль производственного персонала на автотранспортном предприятии/ Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. Изд-во ПНИПУ. - 2019, № 3. - с. 89-95.
9. Гришкевич А. И., Вавуло В. А., Карпов А. В., Молибошко Л. А., Руктешель О. С. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Трансмиссия: учебное пособие для студентов вузов по специальности «автомобили и тракторы». – Мн.: Выш. шк., 1985. – 240 с.
10. Вариаторы: Казус без ступеней. – URL: http://www.zr.ru/content/articles/98931-variatory_kazus_bez_stupenej/#comments (дата обращения 05.02.2016).
11. Нарбут А. Н. Автомобили: Рабочие процессы и расчет механизмов и систем: учебник для студентов вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство». – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 256 с.
12. Шевчук В. П., Попов А. В., Клевин А. В. Анализ гибридной силовой установки «СПЛИТ» на примере автомобиля «Toyota Prius» // Международный Научно-исследовательский журнал – 2014. - № 24.

Сведения об авторах:

Репецкий Дмитрий Станиславович – доцент кафедры «Автомобили и технологические машины». работы: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 614000, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29. Телефон 89194669720. E-Mail: repetsky@pstu.ru.

Мальцев Дмитрий Викторович –доцент кафедры
Автомобили и технологические машины», Пермский
национальный исследовательский политехнический
университет.

614000, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29.,
Телефон 89194669720.
E-Mail: mdv@pstu.ru.

Repetsky D. S., Ph.D.(Tech), Perm national research
Polytechnic University, 29, Komsomolsky prospect, Perm,
614000, Russia.

Maltsev D.V., Ph.D.(Tech) Perm national research Poly-
technic University, 29, Komsomolsky prospect, Perm,
614000, Russia.