

8. Allard, R. F., Moura, F. The Incorporation of Passenger Connectivity and Intermodal Considerations in Intercity Transport Planning. / R.F.Allard, F.Moura // Transport Reviews. – 2015. – № 36(2). – P. 251–277.

9. Xu, Z. A review on passenger emergency evacuation fro multi-modal transportation hubs. / Z. Xu, Q. Bai, Y. Shao, A. Hu, Z. Dong //Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2022. – № 9(4). – P. 591–607.

УДК 629.3

РЫНКЕВИЧ С. А., д-р техн. наук, доц.,
доцент¹

E-mail: rynkev@tut.by

СОНИЧ О. А., магистр,

Зав. Научно-исследовательской лабораторией транспортных средств²

E-mail: oleson@tut.by

¹Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 04.09.2024

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И ИСПЫТАНИЯ ПЕРЕДАЧ СО СЛОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЗВЕНЬЕВ

Рассмотрены вопросы исследования отказов в гидромеханических передачах, у которых звенья совершают сложные движения. Отмечено, что коробки передач в составе гидромеханических трансмиссий (ГМТ), являясь самыми дорогостоящими механизмами автотранспортных средств и других мобильных машин, имеют наименьший срок службы среди остальных агрегатов, причем многие элементы и сопряжения ГМТ, в частности, фрикционы переключения передач, в большой мере ограничивают надежность и долговечность. Проведен анализ причин возникновения опасных дефектов в передачах со сложным движением звеньев. Предложена конструкция мехатронной системы управления гидромеханической трансмиссии как эффективное средство диагностики и мониторинга отказов. Отмечено, что повышение надежности эксплуатации и увеличение ресурса мобильных машин, оснащенных ГМТ, а также безотказная работа фрикционов коробок передач обеспечивается путем комплексной активной диагностики их технического состояния на основе использования микропроцессорных бортовых систем. В процессе проведения ходовых испытаний были исследованы режимы трогания с места и разгона порожнего и груженого самосвала БелАЗ-7555 при автоматическом и командном режимах управления ГМТ. Приведены результаты стендовых и полевых испытаний гидромеханических передач со сложным движением звеньев.

Ключевые слова: сложное движение звеньев, гидромеханическая передача, диагностика, дефект, техническое состояние, фрикционные муфты.

Введение

Для карьерных самосвалов, строительно-дорожной и другой мобильной техники важно обеспечить высокую производительность выполнения транспортной работы, надежность эксплуатации, улучшить условия труда водителя или

оператора, обеспечить безаварийное функционирование всех механизмов и подсистем. Использование коробок передач (КП) с микропроцессорным управлением совместно с бортовыми системами и комплексами, в принципе, позволяет обеспечить эти требования [1].

Анализ опасных отказов передач со сложным движением звеньев

Наряду с преимуществами современных автоматизированных трансмиссий по сравнению с обычными неавтоматизированными трансмиссиями, при эксплуатации мобильных машин (ММ), оснащенных передачами со сложным движением звеньев, возникает ряд проблем. Так, коробки передач в составе гидромеханических трансмиссий (ГМТ), являясь сложным и самым дорогим по стоимости агрегатом ММ, имеют самый малый срок службы по сравнению с остальными устройствами, причем многие его детали, а именно, фрикционы переключения передач, в большой мере ограничивают надежность и долговечность.

При этом поломки этих элементов и их неисправности приводят к опасным отказам и аварийным ситуациям, вплоть до разрушения конструкции (рис. 1), что является большой проблемой для горно-обогатительных предприятий (ГОП), которые эксплуатируют эти машины. Фотография на рис. 1, сделанная одним из авторов в карьере автохозяйства «Гранит» (г. Микашевичи), демонстрирует результат воздействия на коробку передач неблагоприятных отказов. На данном рисунке представлен результат поломки диапазонного вала коробки передач вследствие одновременного включения 2-х передач из-за «спекания» фрикционных дисков передачи, которая должна была выключиться. Подобные дефекты «выводят из строя» трансмиссию на длительное время. Подобное разрушение картеров и корпусных единиц ГМТ не подлежит ремонту и приводит к большим материальным издержкам и финансовым затратам, что связано с полной заменой коробок передач.

Создать же одинаково прочную во всех местах конструкцию, которая бы, отработав определенный срок, «развалилась» и разрушилась бы одновременно, в принципе, невозможно. Если бы это было так, то можно было бы по истечении определенного пробега или срока службы полностью утилизировать машину, заменив ее на новую.

Существующие подходы к решению проблемы улучшения технического состояния ГМТ в процессе эксплуатации ММ и поддержания ее работоспособности эффективны мало. Это отчасти связано с неизбежностью исключения мобильных машин из рабочего цикла по причине из-за аварийных ситуаций и в связи с необходимостью проведения технических обслуживания и ремонтов, часто преждевременных и необоснованных ни технически, ни экономически [2].

Фрикционы переключения передач (ФПП) и фрикционы блокирования гидродинамического трансформатора (ФБГТ) в ГМТ ММ являются наименее долговечными изделиями, что подтверждают многочисленные случаи их отказов в процессе эксплуатации, к примеру, большегрузных автосамосвалов БелАЗ.

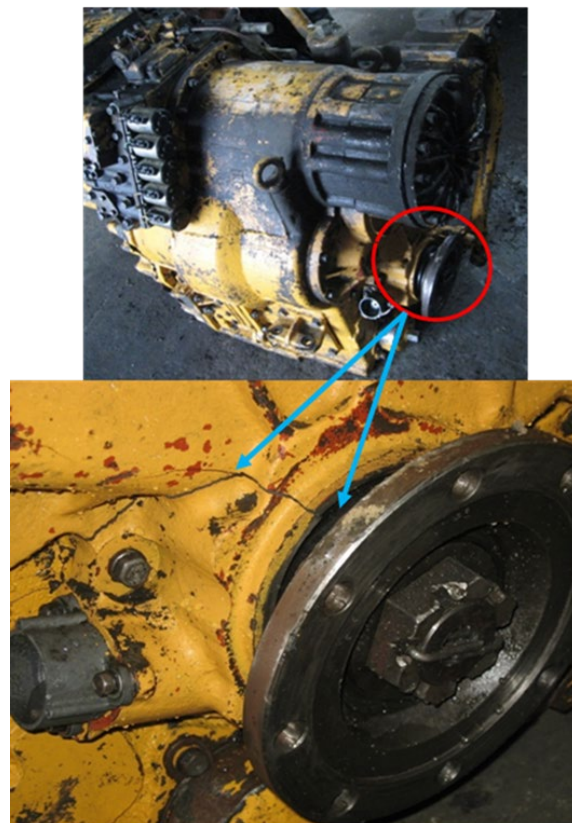


Рисунок 1 – Результат воздействия на коробку передач неблагоприятных отказов

Анализ эксплуатационной информации за 20 последних лет, проведенный в бюро надежности завода «БелАЗ», позволил выявить тот факт, что нередко эти элементы КП в ГМТ приходят в негодность раньше положенного регламентом времени. Это, естественно, создает большие проблемы в ГОП и эксплуатирующих автосамосвалы предприятиях и автохозяйствах. В связи с этим, длительность простоев увеличивается, а производительность резко снижается [3].

Частые поломки ФПП приводят к тому, что длительность работоспособного состояния машин-самосвалов исчисляется порой всего 4–6 месяцев. Это соответствует пробегу автосамосвала 40000–45000 километров. Конечно, нельзя сбрасывать со счетов сложные условия функционирования карьерных самосвалов, которые изобилуют всевозможными нештатными ситуациями. При этом значительные по величине постоянно действующие знакопеременные

параметры динамической и тепловой нагруженности «довершают» разрушение трансмиссионных узлов.

Следует отметить, что возникновению неисправностей при эксплуатации ММ зачастую предшествуют непредвиденные и внезапные обстоятельства. Кроме всего прочего, неисправности элементов ФБГТ и ФПП могут явиться следствием неправильной эксплуатации со стороны водителя или оператора ММ. Реже, но бывают и случаи технологических ошибок при выборе материала и изготовлении накладок и дисков фрикционных.

В процессе многолетних совместных исследований ученых БНТУ и БРУ была получена значительная база данных по дефектам коробок передач, а также получены верхние и нижние ПДЗ (предельно-допустимые значения) для ряда элементов ГМТ мобильной техники [4]. Полученные экспериментальным и расчетным путем массивы ПДЗ определяют пороговые данные, за пределами которых то или иное устройство ГМТ может быть повреждено.

Мониторинг опасных отказов на основе мехатронной системы автоматической диагностики гидромеханической трансмиссии

Современные средства обработки и анализа сигналов, «комбинаторный взрыв», нейрокибернетика и повсеместная цифровизация в автомобилестроении дали толчок к появлению перспективных систем управления и диагностики ММ [4–5]. Это привело к созданию гаммы интегрированных мехатронных систем диагностирования (ИМСД) мобильного применения [5]. По сути, ИМСД представляет собой универсальный бортовой комплекс электронных, электромеханических, электрогидравлических, компонентов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся энергоинформационный обмен, при этом он наделен элементами искусственного интеллекта.

Фактически, это произвело значительный технический прорыв в автомобильной сфере. Так, например, алгоритмы управления/диагностики стали гибко перенастраиваемыми и самоприспосабливающимися. Они приобрели способность принимать изменяющиеся новые условия и ситуации. При этом габариты и массы ИМСД заметно снизились. Также, данные отображаются на информационной панели водителя в режиме онлайн и незамедлительно архивируются, что открывает новые возможности для оперативного прогнозирования [6, 7].

На рис. 2 показана структура ИМСД ГМТ, выполненная в виде находящихся в функциональной связи блоков. Система создана по заказу ОКБ завода «БелАЗ» при участии КБ гидромеханических трансмиссий, которое долгое время возглавлял канд. техн. наук Региня В. В.

Разработанная ИМСД ГМТ была создана с целью проведения экспериментальных исследований [8].

На рис. 3 представлены фотографии стенда с гидромеханической трансмиссией, который расположен в опытно-экспериментальном цехе ОАО «БЕЛАЗ» – управляющей компании холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». Данный стенд, обеспеченный необходимым оборудованием, датчиками, пультовой кабиной и контрольно-измерительной техникой, позволяет ставить эксперименты с автоматизированными гидромеханическими трансмиссиями. Для этого созданный на заводе опытный образец ИМСД ГМТ был размещен на данном стенде (см. рис. 3). В результате стендовых испытаний была произведена оценка характеристик и свойств ИМСД. Были также проверены качество функционирования и работоспособность объекта диагностики, т. е. автоматизированной коробки передач.



Рисунок 2 – Структура ИМСД ГМТ

На заводских площадках проводились также ходовые испытания карьерного автомобиля-самосвала, оборудованного ИМСД, в стабильных условиях воздействия внешних факторов [8–10]. Одной из задач, решаемых в процессе ходовых испытаний, было выявление закономерностей возникновения отказов в зависимости от наработки машины.



Рисунок 3 – Стенд и пультовая кабина в цехе ОАО «БелАЗ» для проведения экспериментальных исследований ГМТ с МСУД

Исследования передач со сложным движением элементов в процессе эксплуатационных испытаний

Для анализа эффективности функциональных свойств ММ, оценки ее надежности в отношении показателей безотказности и долговечности (ресурса), а также проверки эксплуатационной технологичности проводились ходовые (натурные) испытания карьерного автосамосвала. Методикой испытаний также предписывалось определение условий, при которых наступали отказы, поломки, неисправности, нарушения регулировок трансмиссионной части ММ. Дополнительно просчитывались такие параметры, как время и расходы на устранение отказов.

Трасса движения автомобиля-самосвала по заводскому полигону представляет собой утрамбованное щебеночное покрытие. Она имеет горизонтальный прямолинейный участок с поворотом на гору, подъемом в гору с переменным уклоном 6–7 % и спуском с горы с уклоном 11 %.

Порожний и груженный автомобиль-самосвал БелАЗ-7555 при испытаниях подвергался серии заездов на ручном (командном) и автоматическом режиме управления ГМТ. Процессы переключения передач осуществлялись с помощью фрикционных муфт (ФМ) по способу контроля обратной связи по относительной скорости вращения фрикционных дисков при их скольжении.

Непрерывность потока мощности при переключении ступеней обеспечивалась путем задержки выключения фрикциона предыдущей ступени (передачи), причем время этой задержки равнялась длительности этапа быстрого заполнения включаемой ФМ. В этот момент угловая скорость двигателя сбрасывалась на 200 об/мин. Команду на снижение (сброс) угловой скорости двигателя до заданной величины ИМСД ГМТ передает с помощью помехозащищенной CAN-шины с учетом данных о начале и окончании процесса снижения и величины этого сброса скорости.

Схема штатной гидравлической системы ГМТ БелАЗ-7555 дана в [8–9]. Обмен информационными данными между узлами реализуется посредством шины бортового контроллера связи CAN.

Сбор информационных сигналов выполняют встроенные датчики фирмы «Бош Рексрот». Совокупность основных сигналов от датчиков приведена в [9]. Датчики измеряли частоту вращения коленвала двигателя, турбинного колеса ГДТ, промежуточного и выходного валов КП, величины главного давления и давления в каналах фрикционных муфт и т. д. Выходные сигналы ИМСД направляла исполнительным механизмам: ФПП и ФБГТ.

Передача и обработка сигналов с датчиков моментов, давлений, частот вращения входного и выходного валов КП производилась с помощью коммуникационной системы на основе платформы FlexRay и с применением 16-ти канальной платы сбора данных «Орфей-II» (РФ).

Визуальное отображение результатов измерений и получение характеристик осуществлялось путем осциллографирования происходящих в гидромеханической передаче процессов.

Приведенная на рис. 4 осциллограмма иллюстрирует процесс автоматического переключения со второй на третью передачу (2→3). На рис. 4 показано «поведение» ряда параметров, несущих диагностическую информацию: вращающего момента фрикциона $M_{фр}$, давления рабочей жидкости (масла) в питающих магистралях фрикционах второй и третьей передачи p_i , давления в главной магистрали $p_{гл}$, относительной скорости скольжения фрикционных дисков, силы тока на электромагнитных клапанах. Эти характеристики могут также служить источником мониторинговой проверки работоспособности системы при проведении контрольных (тестовых) заездов для оценки технического состояния ГМТ.

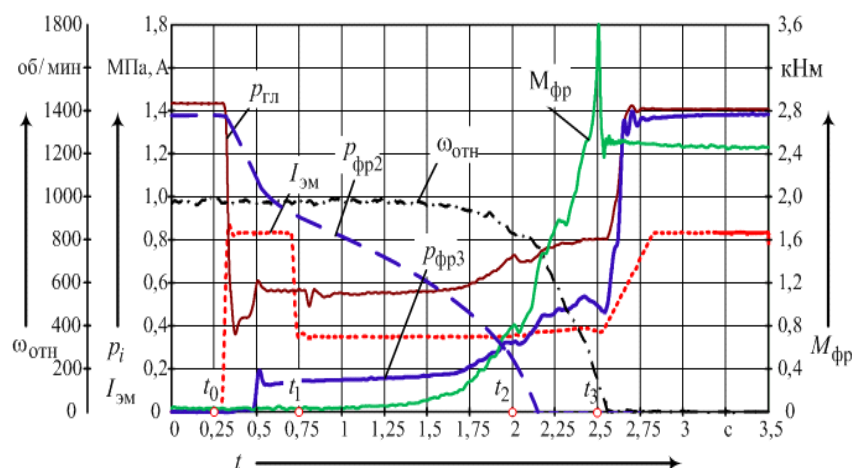


Рисунок 4 – Изменения параметров оценки технического состояния фрикционов коробки передач при автоматическом переключении 2→3

Результаты анализа характеристик переходных процессов в ГМТ на режиме КП «автомат» дает значимую информацию о техническом состоянии основных механизмов и устройств. Особенно важно это оценки состояния ФД. При замыкании ФД относительная угловая скорость вращения дисков равна нулю. Из рис. 4 видно, что с момента времени t_1 до момента времени t_2 происходит медленное заполнение рабочей жидкостью гидроцилиндра фрикциона третьей передачи, а начиная с момента времени t_3 происходит буксование (скольжение) замыкаемых дисков, и давление $p_{фр3}$ резко возрастает. В этот же момент времени t_3 происходит «всплеск» (скачок) момента $M_{фр}$, и далее фиксируется амплитуда первого всплеска давления $p_{фр3}$ во включаемом фрикционе 3-й ступени КП. Эти всплески момента и давления совместно с длительностью $t_{зап}$ заполнения гидроцилиндра фрикциона используется в разработанном Рынкевичем С.А. *методе оперативного диагностирования* технического состояния фрикционных дисков [9].

Наиболее важные результаты экспериментальных исследований ИМСД ГМТ приводятся в [3, 7–10].

Выводы

На основе анализа причин возникновения опасных дефектов в передачах со сложным движением звеньев установлено, что добиться высокого уровня работоспособности мобильных машин возможно на основе всестороннего и своевременного предупреждения отказов и неисправностей еще до момента их зарождения с применением прогрессивных методов диагностирования в режиме реального времени. С использованием новых методов получения, анализа и преобразования информации разработана и испытана мехатронная система управления и диагностирования гидромеханической трансмиссии для карьерного автосамосвала.

Литература

1. Скойбеда, А. Т. Гидромеханические передачи мобильных машин. Проектирование и диагностика / А. Т. Скойбеда, С. А. Рынкевич. – Могилев : УПКП «Могилев. обл. укруп. типогр. им. С. Соболя», 2014. – 230 с.
2. Рынкевич, С. А. Концептуальные основы диагностики гидрофицированных трансмиссий карьерной техники / С. А. Рынкевич // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства. Материалы международной научно-технической конференции. Сборник трудов. – Тюмень. – 2018. – С. 237–241.
3. Рынкевич, С. А. Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий / С. А. Рынкевич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сборник научных трудов: в 2-х томах / Белорусский национальный технический университет; редкол.: отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.
4. Рынкевич, С. А. Управление и диагностирование гидрофицированных трансмиссий: состояние проблемы и перспективы развития / С. А. Рынкевич // Сб. науч. статей «Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии»: Минск – БНТУ. – 2021. – С. 77–88.
5. Рынкевич, С. А. Активный мониторинг сложных элементов гидромеханических передач мобильных машин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 1. – С. 72–79.
6. Рынкевич, С. А. Классификация дефектов передач мобильных машин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 2. – С. 19–24.
7. Рынкевич, С. А. Механические и гидромеханические передачи: анализ работоспособ-

ности и отказы / С. А. Рынкевич // Актуальные проблемы транспорта и логистики. Сборник научных трудов БелГУТ. – 2023. – С. 137–142.

8. Рынкевич, С. А. Система бортового диагностирования и мониторинга гидромеханической передачи автосамосвала / С. А. Рынкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 4 (81). – С. 53–60.

9. Рынкевич, С. А. Экспериментальные исследования физических свойств гидропривода

мобильной машины / С. А. Рынкевич, И. Ю. Хадкевич // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – №4 (45). – С. 56–67.

10. Рынкевич, С. А. Проектирование, эксплуатация и диагностика мобильных машин / С. А. Рынкевич, В. В. Кутузов. – Могилев : Белорус.-Росс. ун-т, 2016. – 223 с.

UDK 629.3

RYNKEVISH S., Doctor of technical Sciences, Ass. Prof.,
Ass. Prof.¹

E-mail: rynkev@tut.by

SONICH O. A., Master,
Head of the Scientific Research Laboratory of Vehicles²

E-mail: oleson@tut.by

¹Belarusian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus

²Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Received 04 September 2024

FAILURE ANALYSIS AND TESTING OF TRANSMISSIONS WITH COMPLEX LINK MOVEMENT

The article considers the issues of studying failures in hydromechanical transmissions, in which links perform complex movements. It is noted that gearboxes in hydromechanical transmissions (HMT), being the most expensive mechanisms of motor vehicles and other mobile machines, have the shortest service life among other units, and many elements and couplings of HMT, in particular, gear shift frictions, greatly limit reliability and durability. An analysis of the causes of dangerous defects in transmissions with complex movement of links is carried out. The design of the mechatronic control system of the hydromechanical transmission is proposed as an effective means of diagnostics and failure monitoring. It is noted that the increase in the reliability of operation and the increase in the service life of mobile machines equipped with the HMT, as well as the trouble-free operation of the clutches of the gearboxes are ensured by complex active diagnostics of their technical condition based on the use of microprocessor-based on-board systems. During the running tests, the modes of starting and acceleration of the empty and loaded dump truck BelAZ-7555 were studied with automatic and command control modes of the HMT. The results of bench and field tests of hydromechanical transmissions with complex movement of links are presented.

Keywords: gear, complex movement of links, hydromechanical transmission, diagnostics, defect, technical condition, friction clutches.

References

1. Skoybeda, A. T. Hydromechanical transmission of mobile machines. Projection and diagnosis / A. T. Skoybeda, S. A. Rynkevich. – Mogilev :

Mogilev enlarged regional printing house named after S. Sobol, 2014. – 230 p.

2. Rynkevich, S. A. Conceptual basis of diagnostics of hydroficated transmissions of quarry

equipment / S. A. Rynkevych // Land transport and technological complexes and means. Materials of the international scientific and technical conference. Collection of works. – Tyumen. – 2018. – P. 237–241.

3. Rynkevich, S. A. Automatic diagnosis of mechanical and hydromechanical transmissions / S. A. Rynkevych // Avtotractorostroenie and avtomobilny transport: collection of scientific works in 2 volumes / Belarusian National Technical University; editor: op. ed. D. V. Kapsky [et al.]. – Minsk: BNTU, 2020. – Vol. 1. – P. 46–50.

4. Rynkevich, S. A. Management and diagnosis of hydrofic transmissions: state of problems and development prospects / S. A. Rynkevich // Sat. science articles «Transport and transport systems: construction, operation, technology»: Minsk. – BNTU. – 2021. – P. 77–88.

5. Rynkevich, S. A. Active monitoring of complex elements of hydromechanical transmissions of mobile machines / C. A. Rynkevich // Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. – 2024. – №1. – P. 72–79.

6. Rynkevich, S. A. Classification of defects in transmissions of mobile machines / C. A. Ryn-

kevich // Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science. – 2024. – № 2. – P. 19–24.

7. Rynkevich, S. A. Mechanical and hydromechanical transmissions: performance analysis and failures / C. A. Rynkevich // Current problems of transport and logistics. Collection of scientific works of BelsUT. – 2023. – P. 137–142.

8. Rynkevich, S. A. System of on-board diagnostic and monitoring of the hydro-mechanical transmission of a truck / S. A. Rynkevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (81). – P. 53–60.

9. Rynkevich, S. A. Experimental studies of physical properties of the hydraulic motor of the mobile machine / S. A. Rynkevich, I. U. Khadkevich // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2015. – № 4 (45). – P. 56–67.

10. Rynkevich, S. A. Projection, exploitation and diagnostics of mobile machines / C. A. Rynkevich, V. V. Kutuzov. – Mogilev : Belarusian-Russian University, 2016. – 223 p.