

5 **Хаханов, В. И.** Зеленая волна – облако мониторинга и управления дорожным движением (Green wave traffic on cloud) / В. И. Хаханов // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2012. – Вып. 160. – С. 4–21.

6 Оборудование для управления дорожным движением [Электронный ресурс] // Официальный сайт ООО «Система Сервис». – Харьков, 2014. – Режим доступа : <http://komkon.ua/product/rtc/>. – Дата доступа : 25.10.2022.

7 Аппаратно-программный комплекс оборудования для управления дорожным движением [Электронный ресурс] // Официальный сайт Киевской АК «Росток». – К., 2014. – Режим доступа : <http://rostok-elekom.com/>. – Дата доступа : 25.10.2022.

8 **Белов, Ю. В.** Трехуровневая архитектура системы распределенной автоматизации управления дорожным движением / Ю. В. Белов, О. А. Гузь, А. Н. Полетаikin // Обеспечение безопасности и комфорта дорожного движения: проблемы и пути решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Х. : ХНУРЭ, ХНАДУ, 2011. – С. 123–126.

9 Продукты для промышленной автоматизации: Интерактивный каталог СА 01/2014. – Сименс, Украина, Департамент IA&DT.

10 Esker F. RFID in Vehicles / F. Esker. – NetWorld Alliance LLC. – 2012. – 143 p.

11 **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и flzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ Петербург, 2005. – 736 с.

УДК 629.3

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕДАЧИ: АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ОТКАЗЫ

С. А. РЫНКЕВИЧ

Белорусско-Российский университет, г. Могилёв

Механические и гидромеханические передачи мобильных и технологических машин работают в сложных условиях эксплуатации [1]. Долговечность этих машин, т. е. их способность длительное время сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации, определяется двумя основными условиями: физическим либо моральным износом. Физический износ наступает в том случае, когда дальнейший ремонт и эксплуатация машин и их важнейших механизмов становятся уже невыгодными, так как затраты превышают доход в эксплуатации. Моральный износ означает несоответствие параметров машины современным условиям их эксплуатации.

Предельное состояние механизмов и машин определяется неэффективностью их дальнейшей эксплуатации из-за старения и частых отказов или увеличения затрат на ремонт. В некоторых случаях критерием предельного состояния ремонтируемых изделий может быть нарушение требований безопасности (например, для транспортных объектов).

Для обеспечения надежности сложных механических и гидромеханических передач (МГМП) необходимо обязательное изучение функциональных взаимосвязей элементов в структуре объекта с учетом всего комплекса внешних воздействий. Важную роль при этом играют характеристики механизмов отказов, а также физические процессы, определяющие работоспособность элементов.

На снижение работоспособности МГМП оказывает влияние ряд факторов. К ним относятся различные физико-механические (деформация, разрушение, разрегулирование, износ и др.), химические (коррозия, разъедание, диффузия и т. д.), тепловые (деструкция, перегрев и др.) явления, протекающие с разной скоростью как независимо друг от друга, так и во взаимосвязи в результате внешних воздействий и внутренних процессов.

Анализ работоспособности элементов МГМП в зависимости от условий функционирования и выбранных оценочных критериев производится с использованием известных теоретических положений по оценке износа деталей, их прочности, герметичности и работоспособности гидроустройств [1, 2].

Для современных сложных гидравлических систем понятие «отказ» не полностью приемлемо. Оно достаточно полно характеризует нарушение работоспособности отдельных элементов и устройств. В сложной разветвленной системе с избыточностью отказ отдельных элементов еще не приводит к отказу всей системы. Чаще его последствия проявляются в снижении эффективности функционирования системы, хотя накопления отказов отдельных элементов, а также воздействия поврежденных деталей на зависимые и связанные с ними элементы могут приводить к полной потере работоспособности всей системы.

Многочисленные исследования и результаты эксплуатационных испытаний подтверждают, что в процессе эксплуатации чаще всего выходят из строя насосы, исполнительные гидроустройства, регулирующая аппаратура, фильтры и трубопроводы [2, 3].

Гидравлические устройства в условиях нормальной эксплуатации с течением времени могут терять работоспособность вследствие изменения свойств и состояний материала деталей, в результате протекания процессов превращения в рабочих жидкостях и поверхностных слоях нагруженных деталей, а также многих других явлений, влияющих на изменение рабочих параметров устройств.

Опыт исследований и эксплуатации мобильных машин различного назначения показывает, что основными процессами, способствующими утрате работоспособности МГМП, являются следующие: трение и изнашивание рабочих поверхностей деталей; усталостные процессы в деталях, подверженных действию переменных нагрузок; старение материалов в процессе эксплуатации и хранения устройств.

При исследовании работоспособности гидравлических устройств следует одновременно учитывать не поддающиеся разграничению процессы: механические разрушения материалов, химические превращения и их кинетику, термодинамические и гидродинамические процессы, сложные взаимодействия между различными звеньями устройств.

Ввиду того, что условия протекания процессов в значительной степени зависят как от случайных внешних воздействий, так и от исполнения устройств и режимов их работы, их характеристики в большинстве случаев могут быть получены в виде вероятностных зависимостей на основании статистических исследований.

Согласно положениям механики разрушений, время t , необходимое для разрушения твердого тела (например, картера коробки передач и корпусных деталей), можно определять с помощью зависимости

$$t = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \zeta\sigma_p}{KT_p}\right), \quad (1)$$

где U_0 – энергия активации процесса разрушения для данного материала; ζ – постоянная, близкая к периоду тепловых колебаний; σ_p – разрушающее напряжение; K – постоянная Больцмана, $K = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град; T_p – температура в области разрушения, град.

Для определения напряжений, приводящих к короблению фрикционных дисков вследствие повышения термических напряжений, можно воспользоваться формулой

$$\sigma = \frac{2E\delta_d\varphi}{r_B + r_H}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; δ_d – толщина диска; φ – угол поворота сечения диска под воздействием разности тепловых расширений диска с нагреваемой и ненагреваемой сторон, определяемый по формуле, экспериментально полученной в заводских условиях при исследовании на стендах фрикционных дисков,

$$\varphi = \frac{2r_B\Delta T}{\delta_d}, \quad (3)$$

r_B и r_H – внутренний и наружный радиусы диска; ΔT – разность между температурой на поверхности и минимально температурой диска.

Прогиб f при короблении диска, вызванный изменением площади контакта и радиальным перепадом температур, для случая несимметричного нагрева вычисляется по формуле

$$f = \varphi(r_H - r_B). \quad (4)$$

Рассмотрим процессы, происходящие при износе элементов гидропривода, а также гидромеханических и механических передач.

Наиболее ответственными элементами, влияющими на надежность МГМП, являются уплотнительные элементы гидроаппаратов, насосов, сопряженных деталей гидропривода. В связи с этим даже небольшой по абсо-

лютной величине износ деталей приводит к потере герметичности и преждевременному выходу из строя устройства в целом [3, 4].

Кроме общего требования минимальной силы трения между сопрягаемыми элементами к ним предъявляется требование обеспечения надежной герметизации, что обуславливается функциональными особенностями гидравлических механизмов и спецификой их работы. Для учета этих противоречивых требований необходимо четко представлять механизм износа в таких элементах и закономерности его протекания.

На основе изучения различных пар трения гидравлических и механических устройств можно выделить несколько характерных классов этих сопряжений (таблица 1).

1 Парты трения с концентричным зазором между деталями.

1.1 Одна из деталей перемещается вдоль своей оси симметрии, а другая остается неподвижной.

1.2 Одна из сопрягаемых деталей вращается вокруг общей оси симметрии, вторая неподвижна.

1.3 Одна из поверхностей (без возвратно-поступательного или вращательного движения) имеет перемещения, изменяющие величину концентричного зазора между деталями.

2 Парты трения с касанием по плоским поверхностям.

2.1 Одна из деталей перемещается в своей плоскости, другая неподвижна или перемещается в другой плоскости.

2.2 Парты трения с соприкасающимися поверхностями, представляющими параллельные стенки кольцевой формы, из которых одна вращается в своей плоскости, а другая неподвижна.

2.3 Одна из поверхностей трения имеет возвратно-поступательное движение (без возвратно-поступательного или вращательного движения) в направлении, перпендикулярном к плоскости, в которой она размещена.

3 Парты трения с касанием взаимодействующих деталей по поверхностям сложных форм.

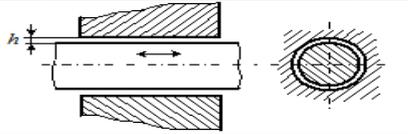
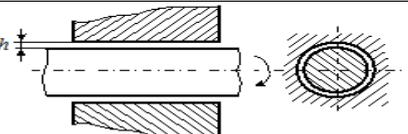
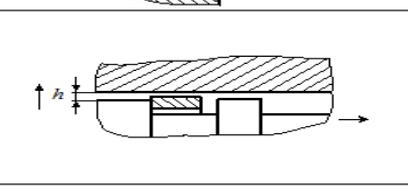
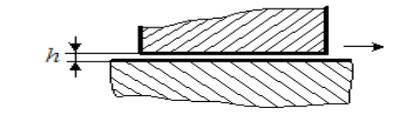
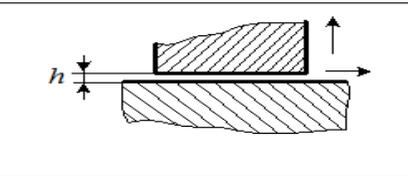
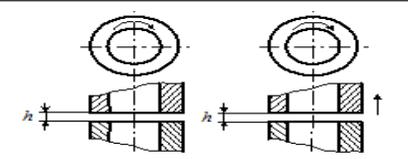
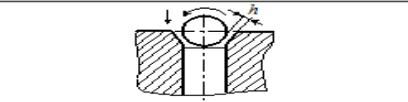
3.1 Парты с перекатыванием и переменным проскальзыванием деталей в контакте.

3.2 Парты с прерывистым движением деталей в различных плоскостях.

Классификация видов пар трения гидравлических и механических устройств позволяет более обоснованно подходить к моделированию условий работы во время испытаний на долговечность, а также выбирать рациональные схемы обеспечения надежности и повышения работоспособности МГМП.

Зубчатые передачи как ответственные элементы МГМП работают в условиях высоких ударных и вибрационных нагрузок в широком диапазоне температур. Задачи поддержания высокого уровня надежности и обеспечения нужного ресурса в условиях эксплуатации требуют своевременного предупреждения, обнаружения и устранения возможных неисправностей, главным образом, скрытых, не выявляемых внешним осмотром.

Таблица 1 – Классы сопряжений элементов для анализа износа в ГМП

Класс 1	Схема взаимодействия 2	Вид сопряжения и типы элементов 3
<i>1 Пара трения с концентричным зазором</i>		
1.1 Перемещение одного элемента вдоль оси при неподвижном другом		Элементы насосов; плунжер-корпус золотника; поршень-цилиндр; шток-элемент уплотнения
1.2 Вращение одного элемента вокруг общей оси при неподвижном другом		Элементы вал-корпус насосов; контрольно-регулирующих устройств
1.3 Перемещение с изменением концентричного зазора между элементами		Поршневые кольца-гильза цилиндра; упругие уплотнительные кольца (манжеты); вали (штоки); детали самоуплотняющихся элементов насосов
<i>2 Парты трения с касанием по плоским поверхностям</i>		
2.1 Перемещение одного элемента в своей плоскости, другой – неподвижен или перемещается в другой плоскости		Элементы плоских золотников; поршневые кольца-стенки канавок поршней
2.2 Пары трения с соприкасающимися поверхностями, представляющими параллельные стенки кольцевой формы, из которых одна вращается в своей плоскости, а другая неподвижна		Элементы торцового распределения насосов; торцовые уплотнения гидроаппаратов
2.3 Одна из поверхностей трения имеет возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном к плоскости своего размещения		Уплотнительные и распределительные элементы гидравлических устройств с гидрокомпенсацией зазоров
<i>3 Пары трения с касанием взаимодействующих деталей по поверхностям сложных форм</i>		
3.1 Пары с перекачиванием и переменным проскальзыванием деталей в контакте		Зацепление шестерен в шестеренном насосе
3.2 Пары с прерывистым движением деталей в различных плоскостях		Элементы клапанов (шарик-гнездо корпуса), дросселей

Для разработки алгоритмов диагностики звеньев и зубчатых зацеплений МГМП необходимо знать, какие же дефекты сопровождают их в процессе эксплуатации, как они отражаются на выходных характеристиках передач и какие диагностические параметры позволят оценить наличие этих дефектов и опасность их для дальнейшей эксплуатации трансмиссии.

При работе практически любой зубчатой передачи, проходя зону зацепления, зубья подвергаются циклическому нагружению. При этом на контактирующих поверхностях зубьев действует нормальная к ним сила и сила трения. Для каждого зуба напряжения изменяются во времени по прерывистому отнулевому циклу. Повторно переменные нагружения являются причиной усталостного разрушения зубьев – это их поломки или выкрашивания рабочих поверхностей.

Скольжение и силы трения в зацеплении вызывают изнашивание и заедание зубьев. При изнашивании рабочих поверхностей зубьев изменяется исходный эвольвентный профиль, меняя направление силовых реакций на подшипники. Увеличиваются зазоры в зубчатом зацеплении, вызывающие дополнительные динамические нагрузки на зубья.

Поскольку от характера дефекта зависят выбор диагностического параметра и методика его определения, то рассмотрим подробнее причины возникновения дефектов и характер их проявления в период эксплуатации.

Усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев – основной вид разрушения зубьев для большинства закрытых хорошо смазываемых передач (рисунок 1, а). Он является следствием действия повторно-переменных контактных напряжений. Разрушение начинается на ножке зуба вблизи полюсной линии, где действуют наибольшая нагрузка (зона однопарного зацепления) и большая сила трения, способствующая образованию микротрещин на поверхности зубьев.

Развитию трещин способствует расклинивающий эффект смазочного материала, попавшего в трещины зубьев. Это приводит к выкрашиванию частиц материала с поверхности, образованию мелких ямок, переходящих затем в более крупные раковины на всей поверхности зубьев. При выкрашивании нарушаются условия образования сплошной масляной пленки (масло выжимается в ямки), что приводит к быстрому изнашиванию и задиру зубьев. Возрастают динамические нагрузки, шум, вибрация, повышается температура.

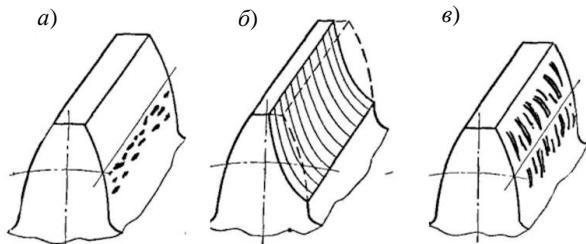


Рисунок 1 – Виды дефектов зубьев

Выкрашивание может быть ограниченным и прогрессирующим. Ограниченное выкрашивание наблюдается на участках с концентрацией напряжения. В колесах, выполненных из хорошо прирабатывающихся материалов, такое выкрашивание после приработки прекращается, не отражаясь на работе передачи. Опасно прогрессирующее выкрашивание постепенно поражает всю рабочую поверхность ножек зубьев.

Предотвращению выкрашивания способствует повышение твердости поверхности зубьев, уменьшение шероховатости рабочих поверхностей, модификация профиля, правильный выбор сорта масла.

Изнашивание зубьев – основной вид разрушения зубьев открытых передач (рисунок 1, б). Интенсивность изнашивания зависит от условий смазки, скоростных и нагрузочных режимов работы. По мере изнашивания зуб становится тоньше, ослабляется его ножка, увеличиваются зазоры в зацеплении, что приводит к потере кинематической точности и, в конечном счете, к поломке зубьев. Изнашивание зубьев может быть как равномерным при правильной эксплуатации трансмиссии, так и неравномерным. Неравномерность износа зубьев по диаметру делительной окружности вызвана смещением делительного диаметра зубчатого колеса по отношению к оси его вращения или прогибом вала, на котором закреплено колесо. В коробках передач с фрикционными муфтами неравномерное изнашивание зубьев возможно при износе поверхностей качения подшипников, на которых размещены ведомые зубчатые колеса постоянного зацепления. При появлении зазора в подшипнике смещается ось вращения зубчатого колеса и при замыкании фрикциона это смещение фиксируется, что и вызывает неравномерный износ зубьев по диаметру делительной окружности.

Изнашивание можно уменьшить защитой от попадания абразивных частиц повышением твердости и понижением шероховатости рабочих поверхностей зубьев, уменьшением скольжения зубьев путем модификации.

Заедание зубьев (рисунок 1, в) заключается в приваривании частиц материала одного зуба к другому (микросварка) в результате разрушения смазочной пленки и местного нагрева, что происходит вследствие высоких давлений и скоростей скольжения в зоне контакта. Оторвавшиеся наросты на зубьях задирают рабочие поверхности сопряженных зубьев, бороздя их в направлении скольжения. Заедание зубьев предупреждают повышением твердости, понижением шероховатости рабочих поверхностей зубьев, применением модификации, подбором противозадириных масел, искусственным охлаждением передачи. Заедание является наиболее опасным видом отказа тяжело нагруженных зубчатых передач.

В процессе автоматизации трансмиссий современных машин следует создавать адаптивные алгоритмы управления и диагностирования для бортовых электронных систем, которые учитывают в режиме реального времени большой объем информации различной физической природы. Такие алгоритмы должны быть наделены интеллектуальными качествами, обеспечивая функции управления, контроля и мониторинга в совокупности трансмиссий и других механизмов мобильных машин на высоком уровне [5].

При решении задач, связанных с анализом работоспособности механических и гидромеханических передач со сложным движением звеньев, необходимо изучить основные физические процессы и условия, способствующие утрате работоспособности этих механизмов. Важно также учитывать динамические процессы, происходящие при износе элементов гидромеханических и механических передач. Для предотвращения опасных дефектов зубчатых передач трансмиссий мобильных машин следует разрабатывать адаптивные алгоритмы для их реализации в электронных системах в режиме реального времени.

Список литературы

1 **Скойбеда, А. Т.** Гидромеханические передачи мобильных машин. Проектирование и диагностика / А. Т. Скойбеда, С. А. Рынкевич. – Могилев : УПКП «Могилев. обл. укуп. типогр. им. С. Соболя», 2014. – 230 с.

2 Повышение долговечности многодискового фрикциона гидромеханической передачи мобильной машины / С. А. Рынкевич [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2011. – № 1 (30). – С. 65–74.

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

4 **Рынкевич, С. А.** Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий / С. А. Рынкевич // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : сб. науч. тр.: в 2 т. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: отв. ред. Д. В. Капский [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.

5 **Рынкевич, С. А.** Управление и диагностирование гидрофицированных трансмиссий: состояние проблемы и перспективы развития / С. А. Рынкевич // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии : сб. науч. ст. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 77–88.

УДК 656.078.12

ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СРЕДНЕТОННАЖНЫХ МОДУЛЕЙ НА КОНТЕЙНЕРЕ-ПЛАТФОРМЕ

*К. И. ШВЕДИН, А. В. ХОМОВ, Н. И. КАМШИЛИН
АО «Всероссийский научно-исследовательский институт
железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), г. Москва*

Единое транспортное пространство и рынок транспортных услуг формируется на основе мультимодальных и интермодальных способов перемещения груза. На примере создания и развития контейнерной транспортно-технологической системы можно проследить как коренным образом менялась технология перевозки грузов в мире. В первую очередь это коснулось морских перевозок, но со временем распространилось и на остальные виды транспорта. Основным технологическим результатом оказался перенос ос-