

УДК 629.3

DOI 10.52928/2070-1616-2025-51-1-13-19

**КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ
МОБИЛЬНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН****д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ****(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
Белорусско-Российский университет, Могилев)**

Рассмотрены вопросы, связанные с контролем и мониторингом механических и гидромеханических передач, которыми оснащены многие мобильные и технологические машины. Проанализированы факторы, влияющие на работоспособность зубчатых передач тех и других трансмиссий. Отмечено, что концентрация нагрузки по длине контактных линий зубчатых зацеплений возникает из-за погрешностей расположения зубьев, упругих деформаций зубьев, валов и их опор. С помощью метода конечных элементов, реализованного в программе конечно-элементного анализа, исследованы показатели, используемые при оценке технического состояния зубчатых зацеплений, входящих в состав гидромеханических передач. Установлено, что работа, затраченная на преодоление силы трения поверхностей зубчатых передач, в основном расходуется на выделение теплоты и изменение внутренней энергии деформируемого объема металла поверхностных слоев. При этом при трении поверхности сопряженных зубьев одновременно катятся и скользят одна относительно другой. Приведены полученные автором результаты анализа напряженно-деформированного состояния зубьев зубчатых зацеплений, которые показывают, что изменение нагрузки, ее неравномерность, перегрев и другие факторы приводят к деформациям зубьев и концентрациям максимальных напряжений в областях впадин и ножек зубьев. При этом постоянный процесс изнашивания снижает ресурс зубчатой передачи.

Ключевые слова: гидромеханическая передача, механическая передача, мобильная машина, технологическая машина, техническое состояние, зубчатое зацепление.

Введение. Для эффективного выполнения мобильными и технологическими машинами, оборудованными механическими и гидромеханическими передачами, транспортной или технологической работы, повышения долговечности и ресурса, а также обеспечения работоспособности необходимо непрерывно в режиме реального времени отслеживать их техническое состояние.

Условия эксплуатации машин с такими передачами являются довольно сложными и многообразными. Долговечность этих машин, т.е. их способность длительное время сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации, зависит от качества и своевременности контроля их технического состояния.

Основная часть. К мобильным машинам относятся автотранспортные средства (грузовые автомобили, легковые автомобили, автобусы), автомобили-самосвалы, автопоезда и т.п. К транспортным технологическим машинам относятся строительно-дорожная техника, подъемно-транспортные машины, путевые машины, машины для погрузки и перевозки различных сыпучих грузов, машины фрезерные, лесовозы, манипуляторы, форвардеры, контейнеры и т.д. Анализ состояния работоспособности мобильных и технологических машин в зависимости от условий функционирования и выбранных оценочных критериев производится на основе теоретических положений по оценке износа деталей и их прочности, а также герметичности и работоспособности гидравлических и гидромеханических устройств.

Рассмотрим параметры и показатели оценки технического состояния механических (МП) и гидромеханических (ГМП) передач.

Различные эксплуатационные факторы и нештатные ситуации вызывают возмущения, действующие на зубчатые зацепления в процессе работы МП и ГМП. Под воздействием этих возмущений изменяются параметры и характеристики МП и ГМП, причем случайный характер возмущений приводит к рассеянию этих характеристик.

Развитие отказа во времени показано на рисунке 1. Если в качестве обобщенного параметра, характеризующего работоспособность МП и ГМП, выбрать вектор $\vec{Y}(y_1, y_2, \dots, y_n)$ (его компонентами для фрикционных и зубчатых зацеплений коробок передач могут быть величины давления, расхода, частоты вращения, температуры, износа как результата изнашивания, интенсивности линейного изнашивания и т.д.), то возникновение внезапных и постепенных отказов определяется скоростью изменения i -го параметра $\frac{dy_i}{dt}$.

По графикам на рисунке 1 можно проследить процесс возникновения внезапных и постепенных отказов.

Момент времени t_0 характеризует длительность предыдущей работы элемента. Резкое, скачкообразное изменение значения параметра y_i приводит к тому, что в момент времени t_1 оно выйдет за пределы допустимых

значений, ограниченные соответствующими порогами (минимальным y_{\min} и максимальным y_{\max} значениями параметра). Произойдет внезапный отказ. Основным признаком внезапных отказов является независимость момента t_1 его возникновения от длительности предыдущей работы элемента. Примерами таких отказов могут служить отказы из-за возникновения трещин при неправильной эксплуатации или возникновения перегрузок, поломок и деформаций деталей в условиях работы, когда каждый параметр принимает экстремальные значения (наибольшая нагрузка, минимальная прочность материала, повышенная температура и т.д.).

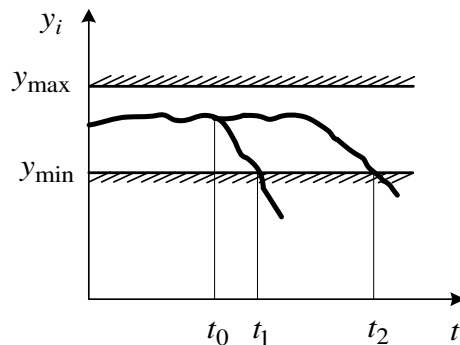


Рисунок 1. – Характеристики изменения параметра y_i во времени t

Условимся считать *параметрами* такие величины y_i , по которым можно судить о состоянии объекта. Рассмотрим типы параметров.

Номинальное (начальное) значение параметра y_n определяется проектно-конструкторской документацией и качеством изготовления изделия. Превышение предельного значения приводит к отказу изделия и недопустимо.

Предельно допустимое значение $y_{\text{пр}}$ предшествует предельному и сигнализирует о необходимости принятия мер по восстановлению технического состояния.

Текущее значение параметра y_i характеризует фактическое техническое состояние изделия. Параметров y_i , определяющих техническое состояние МП и ГМП, несколько (их, как правило, выбирают от 5 до 20).

В процессе эксплуатации МП и ГМП параметры технического состояния изменяются от номинального y_n до текущего, затем до предельно допустимого $y_{\text{пр}}$ и, наконец, до предельного значения под влиянием различных конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов.

Различают также прямые и косвенные параметры. Первые непосредственно характеризуют состояние объекта, а вторые связаны с прямыми параметрами функциональной зависимостью.

Параметры верхнего иерархического уровня детализации технического объекта будем считать *показателями*. Показатели (их еще называют критериями) бывают трех видов.

Технические показатели (критерии) характеризуют предельное состояние составных частей, когда они не могут больше выполнять свои функции по техническим причинам. Например, предельный износ зуба зубчатого колеса делает тонкой ножку этого зуба, что может привести к излому, или же предельный износ фрикционных дисков может привести к пробуксовке при включении передачи. Возможна также ситуация, когда дальнейшая эксплуатация объекта приведет к аварийному отказу (например, работа автомобиля при предельном износе тормозных колодок может привести к аварии).

Технико-экономические показатели (критерии), характеризующие предельное состояние, указывают на снижение эффективности использования объекта вследствие изменения технического состояния (например, при предельном износе цилиндропоршневой группы ДВС угар картерного масла увеличивается более чем на 4%, что указывает на нецелесообразность работы машины с таким двигателем).

Технологические показатели (критерии) характеризуют резкое ухудшение качества выполнения работ по причине предельного состояния рабочих органов машин. Примером может служить выход из строя гидравлической системы фронтального погрузчика, при котором он не может качественно загружать своим ковшем сыпучие грузы, при этом резко снижается производительность погрузчика.

Факторы, влияющие на работоспособность зубчатых передач трансмиссий. На работоспособность зубчатого зацепления, которое приобретает сложную форму в процессе изнашивания и старения, влияют внешние и внутренние факторы.

Внешние факторы:

- значение и характер прилагаемой нагрузки, т.е. сил и моментов;
- концентрация нагрузки по длине зубьев;
- экстремальные перегрузки ударного и статического действия;
- наличие абразивных частиц или веществ, вызывающих коррозию.

Внутренние факторы:

- неподвижность посадочных поверхностей зубчатого колеса и вала;
- характер взаимодействия контактирующих поверхностей;
- взаимное расположение деталей;
- накопление усталостных повреждений.

Концентрация нагрузки по длине контактных линий возникает из-за погрешностей расположения зубьев, упругих деформаций зубьев, валов и их опор. Наличие перечисленных факторов приводит к тому, что сопряженные профили зубьев без нагрузки контактируют не по всей длине. При нагружении зубья деформируются и контактируют по всей длине.

Переменные напряжения являются причиной усталостного разрушения зубьев. В результате происходит поломка зубьев от напряжений изгиба и выкрашивание поверхности от контактных напряжений (рисунок 2). Усталостный излом зубьев является одним из наиболее опасных видов повреждений. Такие изломы происходят в результате воздействия переменных напряжений, которые имеют достаточно большую продолжительность.

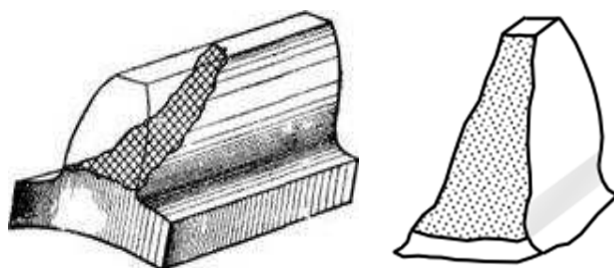
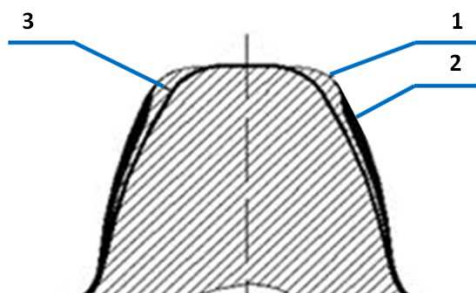


Рисунок 2. – Излом зубьев

Излом зубьев связан с напряжениями изгиба. Может происходить такое негативное явление, как выламывание углов зубьев вследствие концентрации нагрузки.

Изломы зубьев зачастую вызваны чрезмерными перегрузками, которые могут носить ударный или статический характер. Причиной может стать также усталость материала ввиду многократно повторяющихся нагрузок. При этом имеет место процесс накопления повреждений под действием переменных (часто циклических) напряжений с образованием и развитием трещин. Изломы зубьев в МП и ГМП зачастую возникают из-за воздействия динамических ударов. Излом зуба может привести к достаточно тяжким последствиям, вплоть до разрушения валов и подшипников.

Отслаивание твердого поверхностного слоя зубьев (рисунок 3) происходит при резком изменении температурного режима зацепления, когда рост внутренних напряжений приводит к тому, что хрупкая корка зубьев не имеет под собой достаточно прочной сердцевины. Отслаивание возникает из-за перегрузок. Отслаиванию способствует также то обстоятельство, когда под поверхностным слоем величина приведенных контактных напряжений становится достаточно большой. В результате периодического действия глубинных напряжений под упрочненным слоем могут возникнуть усталостные трещины, развитие которых приводит к отслаиванию отдельных участков поверхностного упрочненного слоя. Возможность появления отслаивания существенно зависит от соотношения толщины упрочненного слоя и величины приведенного радиуса кривизны соприкасающихся зубьев.



1 – первоначальный профиль зуба; 2 – разрушения поверхности зуба при заедании;
3 – профиль зуба после отслаивания

Рисунок 3. – Изменение форма профиля зубьев колеса

Разрушение поверхности зуба может происходить и в случае заедания зацепления (см. рисунок 3).

Условием возникновения заедания является разрушение пленки смазочного материала, разделяющей трущиеся металлические поверхности. Заедание зубьев, собственно говоря, – это местное молекулярное сцепление (микросварка) сопряженных поверхностей зубьев вследствие разрушения смазочной пленки и местного повышения температуры при относительном скольжении в зоне контакта.

Для предотвращения появления эффекта заедания зубьев следует повышать твердость поверхностей, а также правильно подбирать противозадирные масла.

Присутствие абразивных веществ, которые вызывают коррозию, порождают и такие явления, как абразивный износ, коррозия поверхности зубьев. Абразивные частицы могут также способствовать возникновению газовой или жидкостной эрозии. Основная причина коррозии, конечно же, – наличие воды в смазочном материале. Коррозия проявляется в виде равномерного (рисунок 4, а) или неравномерного слоя (рисунок 4, б) ржавчины на поверхности зубьев. Происходит самопроизвольное разрушение металла в результате химического и физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Причиной коррозии служит термодинамическая неустойчивость используемых конструкционных материалов к воздействию веществ, находящихся в контактирующей с ними среде. Степень коррозии может быть различной – от незначительной местной точечной или контактной коррозии до сплошной общей коррозии.

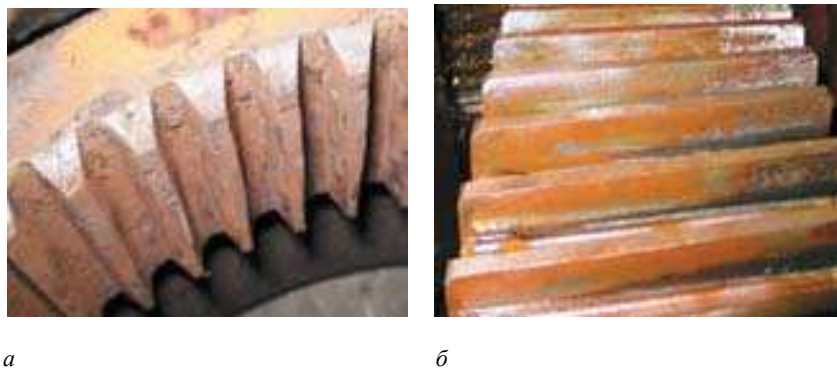


Рисунок 4. – Следы коррозии на поверхности зубьев на равномерном (а) и неравномерном (б) слоях

Факторы, влияющие на работоспособность зубчатых передач трансмиссий, можно выразить численно и использовать аналитически.

Например, для отслеживания характера (динамики) процесса изнашивания можно использовать показатели величины износа y_n (мм или мкм) и скорости износа $\frac{dy_n}{dt}$ (мкм/ч).

Для контроля и мониторинга геометрических и кинематических параметров зубчатых зацеплений МП и ГМП можно использовать показатели и коэффициенты, применяемые в дисциплинах «Основы проектирования машин» и «Детали машин», а также те, которые регламентируются стандартами.

Следует учесть, что проблемой оценки состояния зубчатых передач является кумулятивный эффект накопления дефектов. Степень опасности этих накопленных дефектов зависит как от свойств материала, из которого изготовлены зубчатые передачи, так и от сложности условий эксплуатации.

Анализ изменения параметров и показателей технического состояния механических и гидромеханических передач. Следует отметить, что на современном этапе существует ряд тенденций в изменении технологических и точностных требований к зубчатым колесам и их зацеплениям. Требования к зубчатым передачам становятся жестче, и это обстоятельство связано со сложностью условий эксплуатации и необходимостью увеличить КПД устройств и механизмов, куда входят детали с зубчатым венцом. Это, прежде всего, редукторы и коробки передач. Эти требования тесно связаны с необходимостью снижать стоимость, уровень шума, массу и габаритные размеры; повышать надежность; увеличивать передаваемые момент и мощность; улучшать динамические характеристики; повышать коэффициент полезного действия; увеличивать срок службы и ремонтно-пригодность.

Правильный выбор параметров, которые подвергаются анализу и мониторингу, позволяет выявить такие опасные дефекты и явления, как:

- появление значительного перегрева;
- появление чрезмерного шума;
- достижение предельных значений напряжений изгиба;
- появление критических размеров усталостной трещины;
- повышение контактного давления и нарушение работы передачи;

- значительное увеличение внешнего давления при работе передачи, при котором смазочный материал заходит в микротрещины, расклинивая их;
- нарушение условия образования сплошной масляной пленки;
- увеличение зазоров в зацеплении и потеря кинематической точности;
- возникновение зазора в подшипнике, при котором ось вращения зубчатого колеса смещается, и при замыкании фрикциона происходит неравномерный износ зубьев по диаметру делительной окружности;
- приваривание частиц материала одного зуба к другому, при котором разрушается смазочная пленка из-за местного нагрева, что происходит вследствие высоких давлений и скоростей скольжения в зоне контакта.

Исследованиями установлено, что для контроля и анализа перечисленных выше негативных состояний МГМП для рассмотренного выше вектора работоспособности \bar{Y} достаточно выбрать 12 текущих (изменяющих свои значения) параметров, т.е. Y_i , $i=1$ ¹². Эти параметры носят механическую, тепловую и электрическую природу,

позволяя современными средствами микроэлектроники фиксировать изменение частоты вращения валов, величину износа фрикционных дисков, изменения диаметра зазоров в подшипниковых узлах, температуру в коробке передач, вибрационные сигналы (виброперемещения, виброскорости и виброускорения) и т.д.

Совместными исследованиями с конструкторами завода «БелАЗ» установлено, что дефекты в зубчатых зацеплениях гидромеханических коробок передач возникают при возникновении таких неблагоприятных факторов и явлений, как повышенный износ в области контакта зубчатого зацепления при длительной эксплуатации; появление значительных следов деформации на рабочей поверхности зубчатой передачи; появление на площадках контакта напряжений, превышающих предел выносливости материала; превышение напряжений, действующих на площадках контактов, предела текучести, что вызывает пластические сдвиги на рабочей поверхности зубчатой передачи; возникновение динамических ударов, связанных с непостоянством частоты вращения и изменением направления вращения валов; появление абразивных частиц или веществ, вызывающих коррозию и абразивный износ.

С помощью метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в программе конечно-элементного анализа в ОКБ ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компании холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», были исследованы показатели, используемые при оценке технического состояния зубчатых зацеплений, входящих в состав гидромеханических передач.

На рисунке 5 показано распределение перемещений \bar{u} , возникающих в зубе колеса в процессе работы зацепления. Максимальный прогиб зуба, равный 0,17 мм (на рисунке отмечен стрелкой), соответствует вершине головки зуба. Таким образом, в процессе изнашивания поверхностей (ввиду непрерывного трения) имеет место некоторый изгиб со смещением, что влияет на точность расположения пятна контакта.

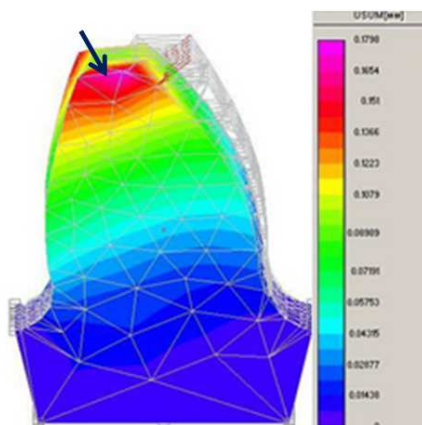


Рисунок 5. – Окно отклика программы МКЭ, отражающее перемещения, возникающие в зубе в процессе его работы

На рисунке 6 показано распределение напряжений в элементах зуба зубчатого колеса, которое приводит в движение механизм технологической машины. Видно, что максимальные напряжения сконцентрированы на поверхностях ножки зуба и его кромках. При этом изнашивание поверхностей зуба носит начальный характер, а напряжения распределены практически равномерно и не достигают опасных значений.

Следует отметить важную особенность зубчатых зацеплений МП и ГМП машин различного назначения. Эта особенность состоит в том, что при работе зубчатой передачи линия контакта зубьев перемещается по высоте зуба, и при этом меняется плечо силы. В процессе работы передачи пара зубьев входит в зацепление сразу

по всей длине линии контакта, что сопровождается ударом зубьев. После этого линия контакта перемещается по высоте зуба, оставаясь параллельной оси.

При составлении расчетной схемы работы зубчатого зацепления на изгиб (что важно при трехмерном моделировании) зуб можно представить как консольную балку с нагрузкой, распределенной по линии контакта.

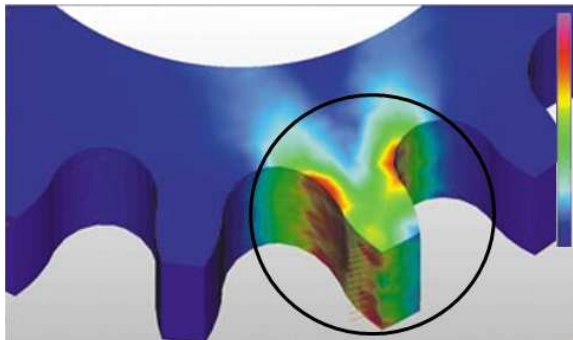


Рисунок 6. – Распределение напряжений в элементах зуба приводного колеса

Установлено, что работа, затраченная на преодоление силы трения поверхностей зубчатых передач, в основном расходуется на выделение теплоты и изменение внутренней энергии деформируемого объема металла поверхностных слоев. При этом при трении поверхности сопряженных зубьев одновременно катятся и скользят один относительно другой.

Приведенные выше результаты анализа напряженно-деформированного состояния зубьев зубчатых зацеплений показывают, что изменение нагрузки, ее неравномерность, перегрев и другие факторы приводят к деформациям зубьев и концентрациям максимальных напряжений в областях впадин и ножек зубьев. При этом постоянный процесс изнашивания снижает ресурс зубчатой передачи.

Передача нагрузки в зубчатом зацеплении осуществляется при касании боковых профилей сопряженных зубьев. Результатом этого взаимодействия (давление зубьев друг на друга) является сложнапряженное состояние. При этом нагружается и поверхность зубьев (имеет место линейный контакт), и весь объем зуба.

В связи с этим работоспособность зубчатой передачи следует оценивать по контактной прочности боковой поверхности зубьев и объемной прочности зуба в случае сложного нагружения. При этом следует учесть, что нагрузка на зуб непостоянна и изменяется она по пульсирующему прерывистому циклу. Другими словами, это нагрузка с установившимся во времени характером изменения, значения которой повторяются через определенный промежуток времени.

Практические исследования подтвердили, что при недостаточной контактной прочности поверхностей зубьев происходит усталостное выкрашивание рабочих поверхностей и излом зубьев (рисунок 7).

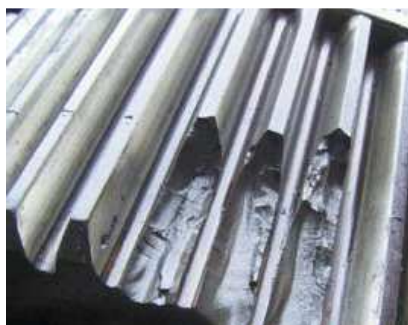


Рисунок 7. – Излом зубьев из-за воздействия динамических ударов

Такой вид дефекта возникает из-за действия повторно-переменных контактных напряжений. В местах постоянного контакта зубьев развивается наибольшая сила трения, при этом появляются микротрещины, что ведет к образованию маленьких ямок, переходящих в раковины.

Заключение. Для контроля и анализа возникающих дефектов в механических и гидромеханических передачах мобильных и технологических машин следует использовать определенную совокупность диагностических параметров (в количестве 10–12), которые могут носить механическую, гидромеханическую, тепловую и электрическую природу. Такой контроль позволяет современными средствами микроэлектроники фиксиро-

вать изменение частоты вращения валов, величину износа фрикционных дисков, изменения диаметра зазоров в подшипниковых узлах, температуру в коробке передач, степень износа зубьев зубчатых зацеплений, а также вибрационные сигналы (виброперемещения, виброскорости и виброускорения). Выявлено, что причиной коррозии служит термодинамическая неустойчивость используемых конструкционных материалов к воздействию веществ, находящихся в контактирующей с ними среде. Установлено, что работа, затраченная на преодоление силы трения поверхностей зубчатых передач, в основном расходуется на выделение теплоты и изменение внутренней энергии деформируемого объема металла поверхностных слоев. При недостаточной контактной прочности поверхностей зубьев происходит усталостное выкрашивание рабочих поверхностей и излом зубьев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рынкевич С.А. Автоматизация диагностирования механических и гидромеханических трансмиссий // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. В 2 т. / отв. ред. Д.В. Капский [и др.]. – Минск: БНТУ, 2020. – Т. 1. – С. 46–50.
2. Рынкевич С.А. Управление и диагностирование гидрофицированных трансмиссий: состояние, проблемы и перспективы развития // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. – Минск: БНТУ, 2021. – С. 77–88.
3. Рынкевич С.А. Активный мониторинг сложных элементов гидромеханических передач мобильных машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 1(49). – С. 71–78. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78
4. Рынкевич С.А. Классификация дефектов передач мобильных машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 2(50). – С. 19–24. DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-19-24

REFERENCES

1. Rynkevich, S.A. (2020). Avtomatizatsiya diagnostirovaniya mekhanicheskikh i gidromekhanicheskikh transmissii [Diagnostic Automation Mechanical and Hydromechanical Transmissions]. In D. Kapsky (Ed.). *Avtotaktorostroenie i avtomobil'nyi transport: sb. nauch. tr. V 2 t. T. 1* (46–50). Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Rynkevich, S.A. (2021). Upravlenie i diagnostirovanie gidrofitsirovannykh transmissii: sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya [Control and Diagnosis of Hydraulic Transmissions: State of The Problem and Prospects for Development]. *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii: sb. nauch. st. (77–88)*. Minsk: BNTU. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Rynkevich, S.A. (2024). Aktivnyi monitoring slozhnykh elementov gidromekhanicheskikh peredach mobil'nykh mashin [Active Monitoring of Complex Elements of Hydromechanical Transmissions of Mobile Machines]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 1(49), 71–78. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78 (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Rynkevich, S.A. (2024). Klassifikatsiya defektov peredach mobil'nykh mashin [Classification of Defects in Mobile Machine Transmissions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 2(50), 19–24. DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-19-24 (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 05.12.2024

CONTROL OF MECHANICAL AND HYDROMECHANICAL GEARS MOBILE AND TECHNOLOGICAL MACHINES

S. RYNKEVICH

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;
Belarusian-Russian University, Mogilev*)

The issues related to the control and monitoring of mechanical and hydromechanical gears, which are equipped with many mobile and technological machines, are considered. The factors that affect the performance of gears of those and other transmissions are analyzed. It is noted that the concentration of the load along the length of the contact lines of the gears occurs due to errors in the location of the teeth, elastic deformations of the teeth, shafts and their supports. Using the method of finite elements implemented in the finite element analysis program, the indicators used in assessing the technical condition of gears included in hydraulic gears are studied. It is established that the work spent on overcoming the friction force of the gear surfaces is mainly spent on the release of heat and on changing the internal energy of the deformable volume of the metal of the surface layers. At the same time, during friction, the surfaces of the mating teeth simultaneously roll and slide one relative.

Keywords: *hydromechanical transmission, mechanical transmission, mobile machine, technological machine, technical condition, gearing.*