

**Г.Л.Антипенко, канд. техн. наук, доц., В.А.Судакова**

## **НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТРАНСМИССИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

В данной работе предложены новые технологии диагностирования технического состояния зубчатых зацеплений и фрикционных элементов трансмиссий мобильных машин на основе использования импульсного метода, легко реализуемого микропроцессорной системой диагностики. Представлены динамическая и математическая модели гидромеханической трансмиссии фронтального погрузчика МоАЗ-4048 как объекта диагностирования. На основе расчетно-теоретических исследований разработаны алгоритмы диагностирования зубчатых зацеплений и фрикционных элементов трансмиссий. Изготовлен и испытан опытный образец диагностического комплекса.

В системах управления строительно-дорожными машинами все большее распространение получают бортовые компьютеры. Они позволяют оптимизировать процессы управления силовой установкой и трансмиссией, обеспечивая высокие тягово-динамические и топливно-экономические показатели. Но ресурсы бортового компьютера позволяют решать значительно больший круг задач. И одним из направлений использования ресурсов компьютера является отслеживание и контроль технического состояния двигателя, трансмиссии, систем управления и рабочего оборудования. В этом случае огромное значение имеет создание алгоритмов диагностирования, позволяющих при ограниченной входной информации, за счет глубокого компьютерного анализа, обеспечить достоверность и оперативность постановки диагноза.

В настоящее время широко распространены методы компьютерной диагностики систем машин. При этом особое внимание уделяется снижению трудоемкости постановки диагноза и его достоверности. Для этого важные узлы машин оснащаются встроенными системами диагностики с выходом на бортовой компьютер или на разъемы для внешнего подключения к компьютерным системам диагностики. Для проведения инспекционного и эксплуатационного инструментального контроля автотранспорта используются современные линии компьютерной диагностики. Они имеют модульный принцип построения, что позволяет комплектовать их для диагностики двигателей, рулевых и тормозных систем, подвески, электрооборудования с выдачей протокола диагностирования на основе анализа полученной информации, исключив субъективный фактор при оценке технического состояния. Для этих систем разработаны достаточно универсальные алгоритмы диагностирования, средства взаимодействия с объектом и группой приборов, входящих в состав линии. Диагностика же трансмиссий на таких линиях не предусмотрена, поскольку трансмиссии, как правило, не приспособлены к компьютерной диагностике и соответственно не имеют необходимого программного обеспечения для этого.

Диагностирование трансмиссии осуществляется по параметрам технического состояния зубчатых зацеплений, подшипников, фрикционных элементов, синхронизаторов и элементов привода. Но ресурс трансмиссии в основном определяется состоянием зубчатых зацеплений и фрикционных элементов. Состояние зубчатых зацеплений оценивается величиной суммарного углового зазора, характеризующего боковой износ зубьев и кинематической неравномерностью вращения выходного вала, характеризующей наличие единичных дефектов зубьев. Состояние фрикционных элементов оценивается отсутствием буксования при передаче максимального крутящего момента от двигателя, величиной остаточного момента трения при выключенных фрикционах, работой буксования при включении (замыкании) фрикционов или плавностью их включения. Плавность включения фрикционных муфт обеспечивается введением в систему управления переключением ступеней в коробке передач клапанов плавности. Нарушение в их работе в процессе эксплуатации приводит к ухудшению плавности движения при переключении ступеней, возрастанию динамических нагрузок в трансмиссии, либо к увеличению работы буксования, и соответственно быстрому износу, высокому нагреву и короблению пар трения. Поэтому разработка новых подходов к диагно-

стированию трансмиссий, ориентированных на использование современных компьютерных средств и информационных технологий является актуальной задачей.

Одним из перспективных методов для компьютерной диагностики состояния зубчатых элементов трансмиссии является импульсный метод, изложенный в патенте РБ № 6802 [1]. Алгоритм диагностирования состояния зубчатых зацеплений в этом случае должен включать анализ шага зацепления на циклических составляющих зубцовой частоты шестерни ведомого вала относительно высокочастотного опорного сигнала, снимаемого с зубчатого венца шестерни, связанной с ведущим валом. Изменение шага зацепления будет указывать на наличие единичных дефектов зубьев шестерен. По периоду повторного появления дефекта легко установить принадлежность их тому или иному зубчатому колесу, поскольку период обращения у каждого зубчатого колеса свой.

Для компьютерной диагностики состояния зубчатых элементов трансмиссии по суммарному угловому зазору, характеризующему боковой износ зубьев, также разработан импульсный метод, изложенный в патенте РБ № 9279 [2]. Алгоритм диагностирования состояния зубчатых зацеплений в этом случае должен также включать анализ шага зацепления на циклических составляющих зубцовой частоты шестерни ведомого вала относительно высокочастотного опорного сигнала, снимаемого с зубчатого венца шестерни, связанной с ведущим валом при подаче на трансмиссию тестового воздействия, направленного на выбор суммарного углового зазора. Изменение шага зацепления при выборе суммарного углового зазора в трансмиссии пропорционально его величине.

Использование импульсного метода целесообразно и для диагностики фрикционных элементов трансмиссий машин по наличию буксования при передаче больших крутящих моментов и плавности переключения ступеней.

Анализируя параметры, по которым оценивается техническое состояние фрикционных элементов и зубчатых передач, можно прийти к выводу, что они так или иначе связаны с изменением относительного углового положения ведущего и ведомого валов трансмиссии. Следовательно, установив бесконтактные датчики углового положения валов на входе и выходе трансмиссии можно адаптировать ее для компьютерной диагностики. В этом случае алгоритм диагностирования должен включать анализ шага зацепления на циклических составляющих зубцовой частоты шестерни ведомого вала относительно высокочастотного сигнала, снимаемого с зубчатого венца шестерни, связанной с ведущим валом. Отклонение шага зацепления в количестве импульсов опорного сигнала от установившегося значения будет характеризовать наличие единичных дефектов, величину суммарного углового зазора, буксование фрикциона или время его включения в зависимости от алгоритма обработки сигнала и вида тестового воздействия на трансмиссию.

Суть метода диагностирования зубчатых и фрикционных элементов трансмиссии показана на рис.1. Для диагностирования зубчатых зацеплений и фрикционных элементов к ведущему колесу, вращающемуся с угловой скоростью  $\varphi_1$ , подведен крутящий момент  $M_d$ , а к ведомому, вращающемуся с угловой скоростью  $\varphi_2$ , момент сопротивления  $M_c$ .

С ведущим колесом связан датчик высокочастотного опорного сигнала U1, представляющий собой либо зубчатый венец с числом зубьев, существенно превышающим число зубьев ведомого колеса, либо энкодер, генерирующий до 1000 и более импульсов опорного сигнала за один оборот ведущего вала, и индукционный датчик, установленный напротив зубчатого венца шестерни, связанной с выходным валом. Датчик выходного сигнала, установленный у зубчатого венца ведомого колеса, считывает импульсы зубцовой частоты U2. Опорные сигналы U1 от ведущего вала и сигналы зубцовой частоты U2 с ведомого колеса поступают в электронный блок для сопоставления их между собой по количеству опорных сигналов в каждом периоде выходного. В итоге, выбор суммарного углового зазора  $\Delta\varphi$  при тестовом воздействии на трансмиссию, будет характеризоваться периодом с меньшим числом опорных сигналов (рис.1).

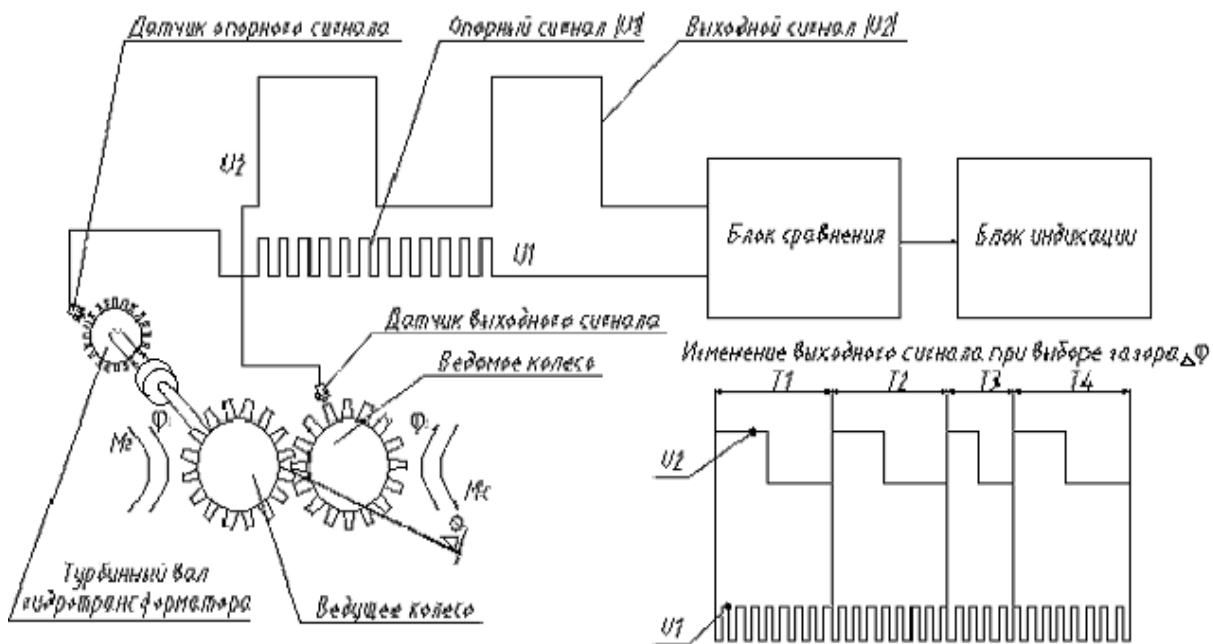


Рис. 1. Схема импульсного метода диагностирования трансмиссии

Алгоритм диагностирования состояния фрикционных элементов также должен включать анализ шага зацепления на циклических составляющих зубцовой частоты шестерни ведомого вала относительно высокочастотного опорного сигнала, снимаемого с зубчатого венца шестерни, связанной с ведущим валом. Изменение числа импульсов с ведущей шестерни относительно шага зацепления ведомой будет свидетельствовать о нарушении кинематической связи между валами, т.е. о наличии переходного процесса (замыкания или буксования фрикциона), а по стабилизации числа импульсов можно судить об окончании переходных процессов. Время буксования фрикционных элементов, косвенно характеризующее работу буксования за время переключения ступеней в коробке передач, определяется длительностью переходного процесса, в течение которого угловые скорости ведущих и ведомых частей фрикциона выравниваются. Это время отсчитывается таймером с момента начала включения фрикциона до выравнивания количества импульсов опорного сигнала в каждом периоде выходного.

Реализацию импульсного метода диагностирования зубчатых зацеплений и фрикционных элементов трансмиссии можно проводить как для стационарных стендов, так и для бортовых систем диагностики. В последнем случае для каждой машины необходимо провести натурные или расчетные исследования, позволяющие найти параметры тестового воздействия, обеспечивающего выбор суммарного углового зазора в трансмиссии на каждой передаче и синтезировать алгоритм определения его величины.

Принимаем в качестве объекта диагностирования гидромеханическую трансмиссию фронтального погрузчика МоАЗ-4048. Коробка передач МоАЗ-4048 четырехвальная, имеет шесть ступеней переднего и одну заднего хода. Переключение ступеней производится многодисковыми фрикционными муфтами. Шестерни коробки передач прямозубые, постоянного зацепления. Для адаптации трансмиссии к компьютерной диагностике она должна быть оснащена датчиками информации, позволяющими отслеживать относительные угловые перемещения ведущего и ведомого валов в местах измерения суммарного углового зазора в коробке передач и на выходе всей трансмиссии относительно опорного сигнала датчика, связанного с турбинным валом гидротрансформатора.

Для исследования процесса выбора суммарного углового зазора в зубчатых зацеплениях, процессов буксования фрикциона при передаче больших крутящих моментов и при замыкании фрикциона, разработаны динамическая и математическая модели трансмиссии как объекта диагностирования. В соответствии с задачами исследований математическая модель долж-

на учитывать инерционные, упругие и диссипативные свойства элементов трансмиссии, определяющие их низкочастотные колебания, а также нелинейные функции, описывающие процесс выбора зазора в зацеплении и буксование фрикциона [3].

Диагностирование трансмиссии по суммарному угловому зазору, после оснащения ее датчиками, можно проводить как на стационарном стенде, так и помощью бортового компьютера в движении. Но при этом необходимо обеспечить выбор зазора в зацеплении. При движении это достигается подачей тестового воздействия на трансмиссию в виде разгона и торможения двигателем, а на стенде – реверсом опорных барабанов. Если для выбора зазора в зубчатом зацеплении использован метод торможения двигателем при движении погрузчика, то тестовым воздействием является резкий сброс педали подачи топлива двигателю. Силы инерции в этот момент будут превышать ведущий момент и способствовать выбору суммарного углового зазора в трансмиссии.

После тестового воздействия крутящий момент на выходном валу коробки передач  $M_2$  уменьшается и достигает нулевого значения (рис.2), т.е. в этот период силы инерции начинают выбирать угловой зазор  $\Delta\varphi$  в коробке передач. После выбора зазора выходной вал закручивается в другую сторону и  $M_2$  становится отрицательным. За счет упругих элементов накапливается потенциальная энергия, вал закручивается и вновь отталкивает шестерню в пространство углового зазора, но повторного выбора зазора не происходит. Это необходимо учитывать при составлении алгоритма подсчета импульсов для расчета суммарного углового зазора.

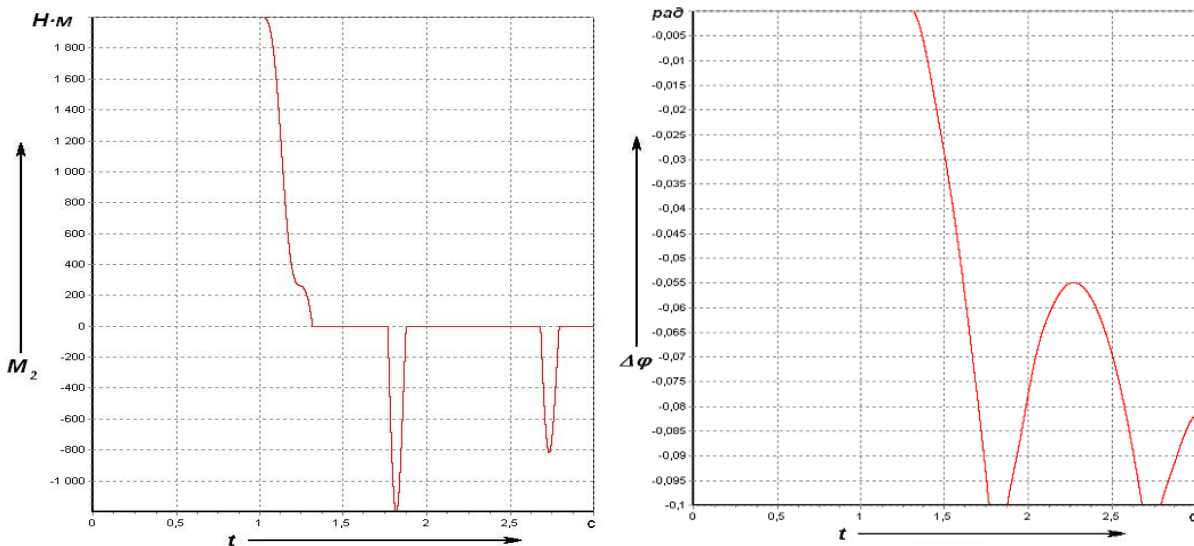


Рис.2. Результаты моделирования процесса выбора суммарного углового зазора в коробке передач

Поведение системы диагностики в этот период показано на рис.3. При подаче на вход динамической системы тестового воздействия количество опорных импульсов  $n_0$  на каждом зубе выходной шестерни коробки передач меняется относительно установившегося значения.

Видно, что эти изменения происходят не только при выборе суммарного углового зазора, но и при относительных угловых перемещениях валов из-за упругости участка трансмиссии от датчика опорного сигнала, до датчика импульсов зубцовой частоты на выходе коробки передач. Следовательно, при наличии колебаний импульсы опорного сигнала  $n$  должны подсчитываться за все время переходного процесса, и для определения реальной величины суммарного углового зазора  $\Delta\varphi_j$  их необходимо соотнести с количеством импульсов опорного сигнала за этот интервал времени в случае наличия жесткой кинематической связи, т.е.

$$\Delta\varphi_j = \frac{n_0 \cdot u_j N_c / z - \sum_{i=1}^{N_c} n_i}{n_0} \cdot 2\pi$$

где  $N_c$  - сумма импульсов выходного сигнала за время диагностирования;  
 $u_j$  - передаточное число трансмиссии от датчика опорного сигнала до выходного датчика на  $j$ -ой передаче;  
 $n_0$  - число импульсов опорного сигнала за один оборот входного вала;  
 $z$  - число зубьев шестерни с которой снимается выходной сигнал.

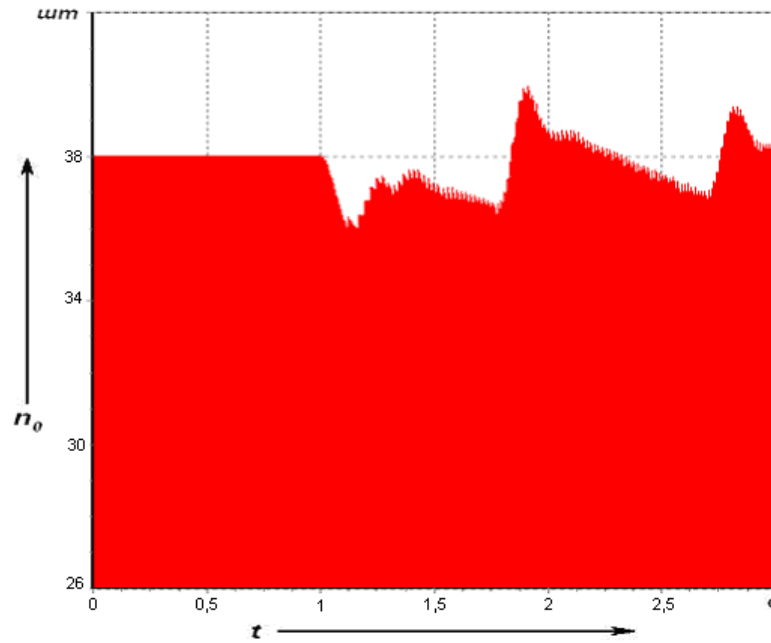


Рис. 3. Характер изменения числа опорных импульсов в каждом периоде выходного сигнала с коробки передач при тестовом воздействии

Диагностирование состояния фрикционных элементов трансмиссии осуществляется по другому алгоритму. При превышении момента сопротивления движению момента, создаваемого фрикционом, происходит буксование последнего. На рис. 4 представлены результаты моделирования процесса буксования и поведения информационных переменных, выбранных для диагностики фрикционных элементов по этому параметру.

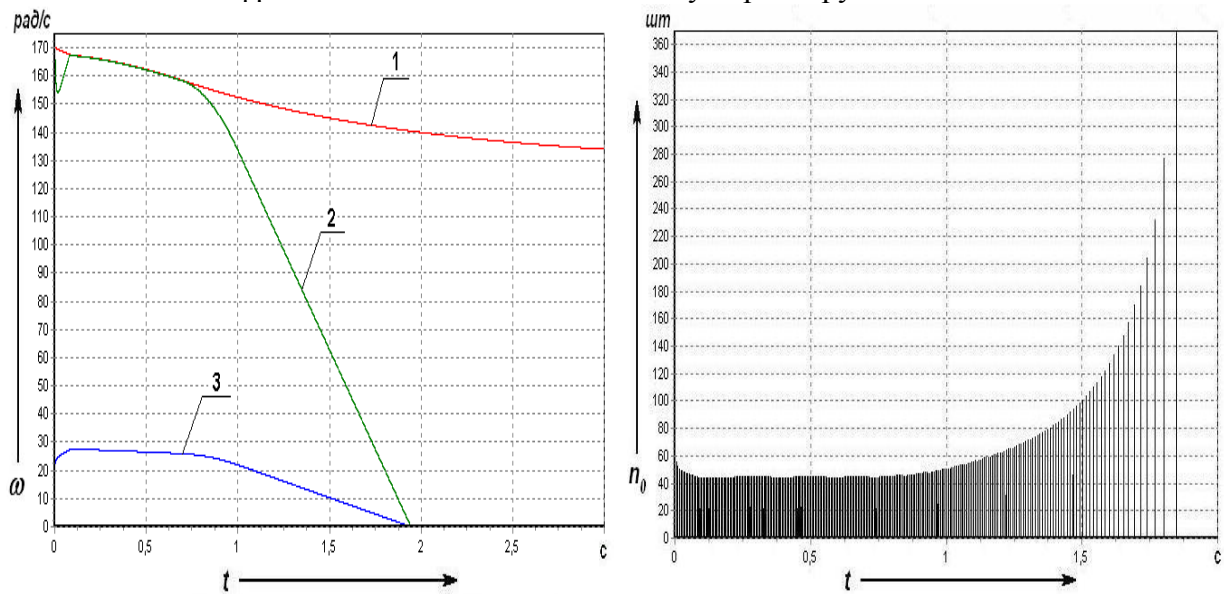


Рис. 4. Процесс буксования фрикциона и поведение информационных переменных системы диагностики в этот момент

С возрастанием момента сопротивления движению погрузчика при общем падении частоты вращения на ведущей 1 и ведомой 2 частях фрикционной муфты и выходном валу трансмиссии 3, система диагностики легко распознает начало возникновения буксования по возрастанию количества опорных импульсов  $n_0$  за поворот на один зуб шестерни, связанной с выходным валом, относительно установившегося значения. Для контроля этого параметра необходимо вести подсчет импульсов опорного сигнала за каждый период зубцовой частоты выходного сигнала коробки передач и сравнивать их между собой. При отсутствии буксования эта разница должна быть равна нулю, в противном случае имеет место буксование.

Для оценки плавности включения фрикционных муфт, характеризующей в том числе состояние клапана плавности, был также смоделирован процесс включения фрикционов и поведение системы диагностики в этот момент (рис. 5). Время буксования фрикционных элементов  $t_{уп}$ , характеризующее работу буксования за время переключения ступеней в коробке передач, определяется временем переходного процесса. Для его определения в момент включения передачи компьютером запускается таймер, фрикцион постепенно замыкается и частота вращения ведомого вала 2 начинает увеличиваться и при достижении некоторого момента выходной вал 3 начинает разгон погрузчика. В этом случае в каждый последующий момент времени снимаемое число импульсов  $n_0$  с датчика опорного сигнала при повороте шестерни ведомого вала на один зуб, постоянно убывает по отношению к предшествующему периоду.

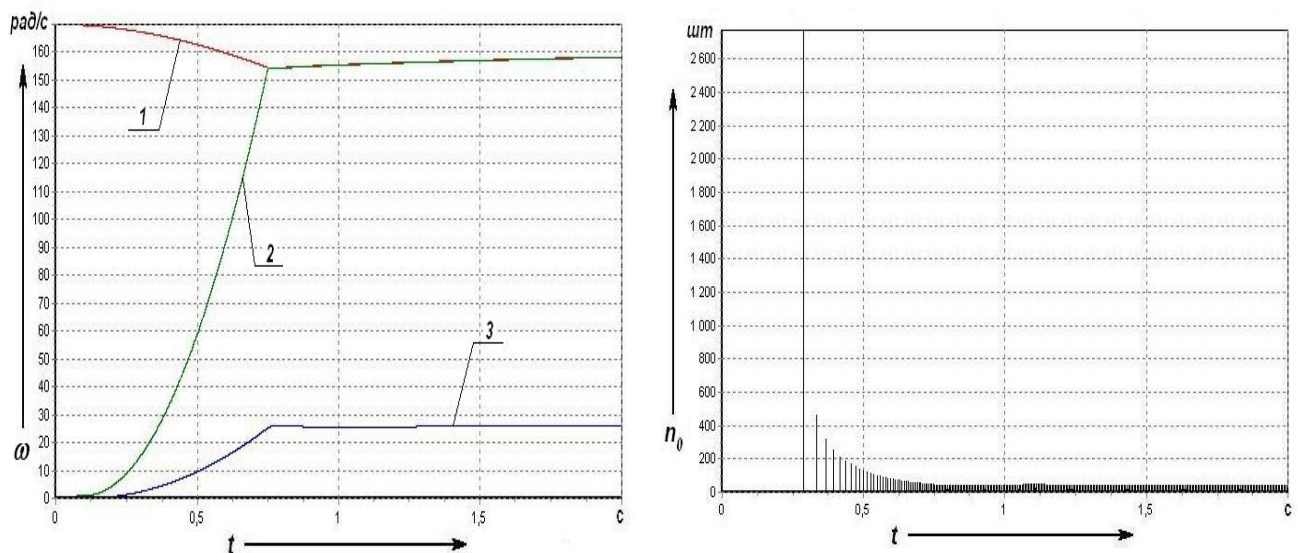


Рис. 5. Изменение угловых скоростей ведущей и ведомой частей фрикциона при включении и изменение числа импульсов опорного сигнала за поворот выходной шестерни на один зуб

Число импульсов на каждом периоде выходного сигнала датчика сопоставляется с предыдущим и при разности равной нулю таймер останавливается. Это будет свидетельствовать о том, что скорости ведомой 2 и ведущей 1 частей фрикционной муфты уравнились и процесс буксования прекратился. Если будет известен характер изменения момента трения фрикциона, то можно найти работу буксования фрикциона, а при необходимости его температуру и сопоставить с допустимыми значениями для применяемой пары трения. Таким образом, анализируя выходной сигнал системы диагностики трансмиссии можно оценить как техническое состояние фрикциона, так и эффективность работы клапана плавности по работе буксования или по величине углового ускорения выходного вала, пропорционального продольному ускорению погрузчика.

Продольное ускорение погрузчика при переключении ступени в ГМКП, без учета демпфирующих способностей шин, можно выразить через угловое ускорение выходного вала. Его легко определить из анализа информации от системы диагностики. Угловое ускорение –

это приращение угловой скорости  $\Delta\omega$  за среднюю продолжительность между соседними импульсами  $T_i$  и  $T_{i+1}$ , т.е. за период времени  $(T_i + T_{i+1})/2$ . Поскольку один импульс выходного сигнала – это поворот шестерни, связанной с выходным валом, на один зуб, то приращение угловой скорости в рад/с найдется из выражения

$$\Delta\omega = 2\pi/z (1/T_{i+1} - 1/T_i)$$

Тогда, угловое ускорение в рад/с<sup>2</sup> можно отслеживать постоянно анализируя длительность соседних импульсов выходного сигнала датчика по зависимости

$$\varepsilon_i = 4\pi/z ((T_i - T_{i+1})/(T_i * T_{i+1}(T_i + T_{i+1})))$$

Проведенные расчетно-теоретические исследования показывают, что любую трансмиссию мобильной машины легко адаптировать к компьютерной диагностике. При этом можно получить высокую точность постановки диагноза при минимальных затратах, используя современные средства диагностики. Создание системы компьютерной диагностики на основе предложенного импульсного метода диагностирования трансмиссий позволит существенно снизить затраты на эксплуатацию, поскольку трудоемкость ремонтных работ по трансмиссии при выходе ее из строя, достаточно велика.

Таким образом, используя анализ шага зацепления ведомой шестерни относительно высокочастотного опорного сигнала, генерируемого с ведущего вала, путем подсчета импульсов на каждом периоде зубцовой частоты и длительности этих периодов, легко оценить и техническое состояние фрикционных элементов гидромеханической трансмиссии, используя компьютер с соответствующим алгоритмом обработки данных, как средство диагностирования.

Для реализации импульсного метода диагностирования зубчатых элементов трансмиссии по суммарному угловому зазору разработан диагностический комплекс ДК-1 как средство диагностирования. Согласно общим тенденциям развития систем контроля и диагностики комплекс ДК-1 содержит две независимые части. Одна – микропроцессорный модуль, выполняющий функции устройства сопряжения датчиков с микропроцессором и накопителя информации. Другая – персональная ЭВМ (ПЭВМ) с соответствующим программным обеспечением, выполняющая функции обработки результатов измерения и постановки диагноза. Основной упор при создании ДК-1 сделан на то, что наиболее важные и ответственные операции при диагностировании переданы ПЭВМ. Основу аппаратных средств составляет микропроцессорный модуль, который управляется от ПЭВМ и выполняет непосредственное снятие измерительной информации с датчиков и ее предварительную обработку в такой вид, в котором она может быть передана на ПЭВМ для соответствующей обработки программными средствами.

Передача ряда функций комплекса ПЭВМ обеспечивает быстрое получение больших объемов информации, ее обработку, хранение и представление в удобном для пользователя виде, а также предусматривает возможность автоматизации основных операций, что значительно упрощает работу с ДК-1. Полученная и обработанная информация хранится в виде файлов в памяти ПЭВМ, либо на другом магнитном носителе. Результаты измерений могут передаваться (экспортироваться) в цифровом виде в другие программные приложения среды Windows для дополнительной обработки, не предусмотренной программными средствами.

Результаты диагностирования на экране компьютера отображаются в виде окна с исходными данными, результатами диагностики и графиками, позволяющими контролировать вид и характер тестового воздействия на трансмиссию. Это график изменения частоты вращения маховика двигателя и график изменения контролируемого параметра – изменения количества импульсов опорного сигнала в каждом периоде выходного сигнала (рис.6).

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что диагностический комплекс ДК-1, реализующий импульсный метод диагностики зубчатых зацеплений, позволяет оперативно оценивать техническое состояние трансмиссий по параметрам суммарного уг-

лового зазора в зубчатых зацеплениях с погрешностью, зависящей от алгоритма обработки результатов измерений.

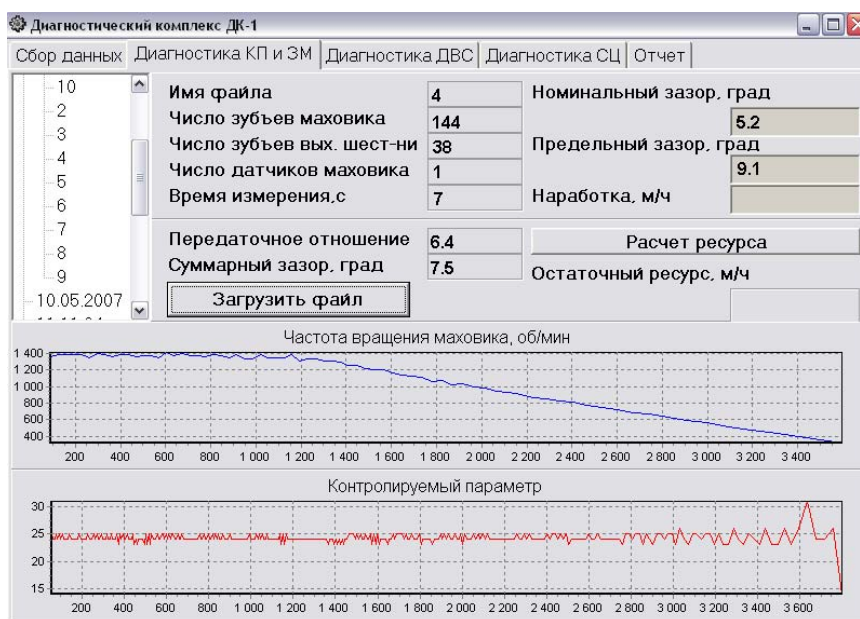


Рис.6. Отображение на мониторе результатов диагностики трансмиссии по суммарному угловому зазору при тестовом воздействии на трансмиссию

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали возможность создания компьютерных средств диагностирования трансмиссий и направления развития их как в плане повышения точности, так и расширения возможностей для углубления диагностирования не только зубчатых зацеплений, но и других элементов трансмиссий, подтвердили перспективность выбранного направления, его универсальность и легкость адаптации к нему различных типов трансмиссий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 6802 ВУ, С1 G 01М 13/02. Способ диагностирования зубчатых зацеплений механических передач / Г.Л.Антипенко, Д.Г.Антипенко, А.Н.Максименко, Б.М. Моргалик (РБ). - №а20020570; Заявлено 02.07.2002; Опубл. 30.03.2005.- 5 с. : ил.
2. Пат. 9279 ВУ, С1 G 01М 13/02. Способ диагностирования зубчатых зацеплений механических передач / Г.Л.Антипенко, Д.Г.Антипенко, А.Н.Максименко, Б.М. Моргалик (РБ). - №а20040773.
3. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Мн.: Дизайн ПРО. 2004 – 640с.

#### NEW TECHNOLOGIES OF TRANSMISSIONS DIAGNOSING OF MOBILE MACHINES

In the given job new technologies of gear gearings a technical status of diagnosing and frictional elements of mobile machines transmissions on the basis of use the pulse method easily sold by microprocessor system of diagnostics are offered. Dynamic and mathematical models of hydromechanical transmission of front loader MoAZ-4048 as object of diagnosing are presented. On the basis of settlement-theoretical researches algorithms of diagnosing of gear gearings and frictional elements of transmissions are developed.







ПАТВЯРДЖАЮ  
Праект артыкула навуковай рабоце  
Ф.Г.Лаўшэнка  
200 7 г.

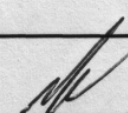
**ЭКСПЕРТНАЕ ЗАКЛЮЧЭННЕ**  
**аб магчымасці апублікавання матэрыялаў у друку і іншых сродках масавай**  
**інфармацыі**

**Эксперт Беларуска – Расійскага універсітэта**  
**Міністэрства адукацыі Рэспублікі Беларусь**  
**Міністэрства адукацыі Расійскай Федэрацыі**

**Разглядзеўшы** Статью “Новые технологии диагностирования трансмиссий  
мобильных машин.” Антипенко Г.Л., Судаковой В.А  
(від, назва матэрыялаў, прозвішча аўтараў)

**пацвярджае, што ў матэрыялах:** не имеется сведений, подлежащих  
защите от распространения  
(ці маюцца звесткі, якія падлягаюць абароне ад распаўсюджвання)

**Заклучэнне** в материалах статьи “Новые технологии диагностирования  
трансмиссий мобильных машин.” Антипенко Г.Л., Судаковой В.А не  
содержится сведений, подлежащих защите от распространения и они могут  
быть опубликованы в открытой печати

**Эксперт**  Лесковец И.В., заведующий кафедрой  
“Строительные, дорожные, подъемно-транспортные машины и  
оборудование ”

(подпіс, прозвішча, пасада)