ТРАНСПОРТ

УДК 629.114.2–235

А. Н. Максименко, канд. техн. наук, доц., Б. М. Моргалик,
А. М. Даньков, д-р техн. наук, доц., В. В. Кутузов

ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРАНСМИССИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН

В работе рассмотрены принципы формирования контролируемого параметра объекта диагностирования на основе геометрических характеристик трансмиссионной цепи. Формализован общий подход количественной оценки диагностического параметра. Проведена оценка контролепригодности новых моделей мобильной техники с помощью разработанного программного продукта.

В настоящее время строительные и дорожные машины (СДМ), занятые и используемые в строительстве различных объектов, работают в условиях повышенного абразивного износа и динамических нагрузок. Эффективность применения данной техники определяется, в основном, ее работоспособностью в условиях эксплуатации.

Затраты, связанные с проведением технических обслуживаний и ремонтов за срок службы СДМ, превышают в 8…10 раз ее первоначальную стоимость. При этом более половины строительных и дорожных машин, используемых в производстве работ, с истекшим сроком службы. Кроме того, отказ техники, используемой при комплексной механизации строительных работ, влечет за собой потери времени и средств из-за полной остановки работ.

Снижение затрат на поддержание и восстановление работоспособности СДМ и вероятности их отказов в процессе эксплуатации возможно при условии достоверной и полной оценки их состояния и прогнозирования остаточного ресурса отдельных сборочных единиц, агрегатов, систем и машины в целом.

Одним из наиболее уязвимых узлов с точки зрения надежности и остаточного ресурса является трансмиссия и ее сборочные единицы в отдельности, работоспособность которых определяется состоянием зубчатых зацеплений. Современные методы диагностики и контроля состояния зубчатых зацеплений с известной точностью позволяют отслеживать динамику изменения технических характеристик и параметров, характеризующих их работоспособность.

Одним из наиболее новых и современных методов диагностики является метод, запатентованный в Республике Беларусь. Сущность данного метода диагностирования зубчатых зацеплений заключается в анализе подсистемы «двигатель – трансмиссия» путем сравнения количества импульсов, генерируемых первичными преобразователями, установленными на входном и выходном звеньях кинематической цепи. Конструктивная реализация метода заключается в установке датчиков перемещения возле источника опорного и выходного сигналов с последующим снятием сигналов и обработкой разработанными алгоритмами в режиме тестового воздействия, при котором вначале обеспечивается выбор зазоров в одном направлении (разгон трансмиссии), а затем – в другом (торможение трансмиссии приводящим двигателем, когда силы инерции зубчатых колес будут превышать движущие силы).

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Методика применения импульсного метода приведена в опубликованных работах [1, 2].

Важнейшими критериями применения всех методов диагностирования является информативность и точность оценки. В контексте упомянутых критериев основная техническая проблема предложенного метода диагностирования трансмиссионных зубчатых передач состоит в том, что точность или разрешающая способность данного метода зависит от конструктивных особенностей трансмиссии объекта диагностирования.

Разрешающая способность импульсного метода диагностирования определяется необходимостью проведения технического обслуживания и контроля состояния трансмиссионных зубчатых зацеплений при 25, 50, 75, и 100 % выработки ресурса. На первом этапе математическое выражение предложенной схемы измерения и оценки состояния трансмиссионных зубчатых передач будет выглядеть следующим образом:

$$n_{max} = (z_{max} \cdot u_n) / z_{вых}, \quad (1)$$

где n_{max} – количество опорных импульсов, соответствующих выходному импульсу выходного зубчатого колеса; z_{max} – число зубьев маховика или опорных сигналов за один его оборот; u_n – передаточное число диагностируемой кинематической цепи; $z_{вых}$ – число зубьев зубчатого колеса, возле которого установлен датчик в диагностируемой кинематической цепи трансмиссии (далее – выходное зубчатое колесо).

Следующим этапом является формирование выражения, которое переводит зазор, выраженный в линейных единицах длины дуги начальной (делительной – при отсутствии коррекции) окружности выходного зубчатого колеса в количество опорных импульсов, получаемых входным первичным преобразователем так называемого выражения дифференцированного зазора:

$$n_n = n_{max} \cdot j_n, \quad (2)$$

где j_n – длина дуги делительной окружности выходного зубчатого колеса в линейных единицах.

Например, сомножитель j_n, определяемый в единицах длины дуги делительной окружности выходного звена по двухступенчатой схеме трансмиссии, определяется следующим образом (рис. 1).

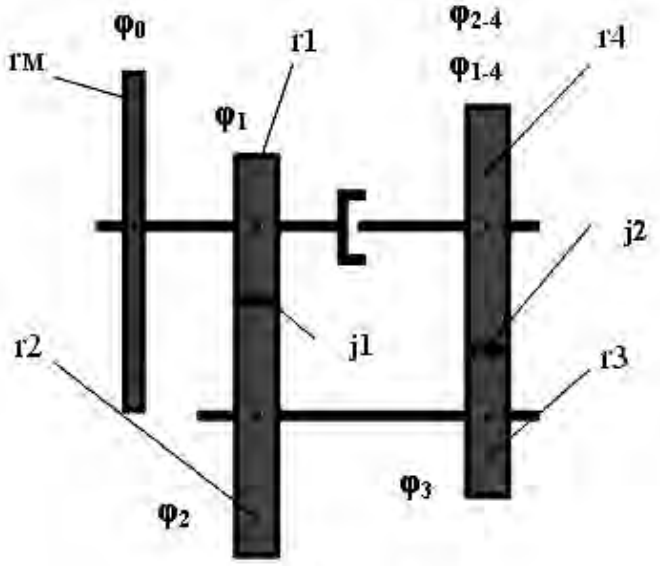

Рис. 1. Схема отсчета боковых зазоров j_1, j_2 в механической коробке передач

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Согласно схеме на рис. 1 в коробке передач имеются боковые зазоры j_1 – в зацеплении зубчатых колес с делительными радиусами r_1 и r_2, а также j_2 – в зацеплении зубчатых колес с делительными радиусами r_3 и r_4 (индексы в обозначениях боковых зазоров соответствуют зубчатым зацеплениям коробки передач).

Отсчет величин боковых зазоров осуществляется относительно выходного зубчатого колеса с делительным радиусом r_4. Тогда величина φ_2 в радианах бокового зазора j_2 на выходе определится из выражения

$$\varphi_2 = j_2 / r_4. \quad (3)$$

Так как величина φ_2 измеряется относительно выходного зубчатого колеса коробки, можно записать $\varphi_2 = \varphi_{2\text{-}4}$.

Величина φ_1 в радианах зазора j_1, приведенная к выходному валу (выходному зубчатому колесу) коробки передач, определяется из следующего выражения:

$$\varphi_{1\text{-}4} = (j_1 / r_2) \cdot r_3 / r_4. \quad (4)$$

Величина суммарного углового зазора коробки передач относительно выходного зубчатого колеса определится как сумма предыдущих составляющих:

$$\varphi_{\Sigma\text{-}4} = \varphi_{1\text{-}4} + \varphi_{2\text{-}4} \quad (5)$$

или

$$\varphi_{\Sigma\text{-}4} = (j_2 / r_4) + (j_1 / r_2) \cdot r_3 / r_4 . \quad (6)$$

Тогда величина суммарного зазора $\varphi_{\Sigma\text{-}4}$, выраженная в единицах длины делительной дуги выходного зубчатого колеса с делительным радиусом r_4, определится из выражения

$$j_{\Sigma\text{-}4} = \varphi_{\Sigma\text{-}4} \cdot r_4 \quad (7)$$

или

$$j_{\Sigma\text{-}4} = [(j_2 / r_4) + (j_1 / r_2) \cdot r_3 / r_4]\, r_4. \quad (8)$$

Требуемый уровень достоверности диагностирования достигается оптимальным подбором количества опорных импульсов за промежуток времени, в качестве которого будет выступать промежуток времени одного импульса, генерируемого выходным зубчатым колесом. В общем виде подобное выражение может быть описано следующей функциональной зависимостью:

$$n_n = f\,(i, j_n, \Delta j_n, z_{max}, z_{1n}, z_{2n}, u_o, m_{вых}), \quad (9)$$

где i – количество ступеней (сопряжений зубьев) в данной кинематической цепи; Δj_n – суммарный износ зубьев зубчатых колес исследуемой ступени кинематической цепи; z_{1n} – число зубьев шестерни исследуемой ступени кинематической цепи; z_{2n} – число зубьев колеса исследуемой ступени кинематической цепи; u_o – передаточное число исследуемой кинематической цепи; $m_{вых}$ – модуль зацепления выходного звена.

Следует учитывать, что при недостаточном количестве опорных сигналов, приходящихся на один выходной сигнал на определенной передаче, определяющей состав исследуемой кинематической цепи, первичный преобразователь может быть расположен не только возле выходного зубчатого колеса, но и в позициях, дающих максимальную информацию о состоянии зацеплений на данной передаче. Это изменяет передаточное число исследуемой кинематической цепи, что должно быть учтено в дальнейших расчетах, а также изменяет количество отдельных контролируемых узлов трансмиссии и структуру диагностирования объекта в целом.

С учетом предыдущих математических преобразований выражение отсчета дифференцированного зазора в импульсах X маховика для ступени механической трансмиссии примет вид:

$$X = \frac{(j_n + \Delta j_n) \cdot \prod_{k=1}^{i} \frac{z_{1k}}{z_{2k}}}{\pi \cdot m_{вых}} \cdot \frac{z_{max} \cdot u_n}{z_{вых}}, \quad (10)$$

где z_{1k} – число зубьев шестерни k-й ступени исследуемой кинематической цепи; z_{2k} – число зубьев колеса k-й ступе-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

ни исследуемой кинематической цепи; $m_{вых}$ – модуль выходного зубчатого колеса.

Величине X должно соответствовать количество опорных импульсов n_n:

$$n_n = n_{nj} + n_{n\Delta j}, \qquad (11)$$

где n_{nj} – количество опорных импульсов маховика, соответствующих номинальному зазору j_n исследуемой зубчатой пары; $n_{n\Delta j}$ – количество опорных импульсов маховика, соответствующих величине износа Δj_n зубчатого зацепления исследуемой зубчатой пары.

Тогда выражение отсчета дифференцированного зазора с учетом предыдущего выражения примет вид:

$$n_{nj} + n_{n\Delta j} = \frac{(j_n + \Delta j_n)\cdot\prod_{k=1}^{i}\frac{z_{1k}}{z_{2k}}}{\pi\cdot m_{вых}}\cdot\frac{z_{max}\cdot u_n}{z_{вых}}. \qquad (12)$$

В случаях, когда составляющая $n_{n\Delta j}$ отсутствует или объект исследования находится на начальной стадии эксплуатации, выражение принимает вид:

$$n_{nj} = \frac{j_n\cdot\prod_{k=1}^{i}\frac{z_{1k}}{z_{2k}}}{\pi\cdot m_{вых}}\cdot\frac{z_{max}\cdot u_n}{z_{вых}}. \qquad (13)$$

При решении обратной задачи, заключающейся в подборе параметра диагностирования z_{max} при известных n_{nj}, $z_{вых}$, j_n, u_n и $m_{вых}$, общее выражение для всей кинематической цепи передачи будет иметь вид:

$$z_{max} = \sum_{k=1}^{i}\frac{\left(n_{nj} + n_{n\Delta j}\right)\cdot\pi\cdot m_{вых}\cdot z_{вых}}{\left(\left(j_n + \Delta j_n\right)\cdot\prod_{k=1}^{i}\frac{z_{1k}}{z_{2k}}\cdot u_n\right)\cdot u_n}. \qquad (14)$$

Таким образом, используя последнее выражение для определения дифференцированного зазора и варьируя критериями i, Δj_n, $m_{вых}$, z_n, можно реализовать определение числа зубьев (количества опорных импульсов) на входном первичном преобразователе.

Итоговый формализованный математический аппарат для решения прямой задачи определения количества опорных импульсов с учетом всех ступеней исследуемой кинематической цепи выглядит следующим образом:

$$\sum_{k=1}^{i}\left(n_{nj} + n_{n\Delta j}\right) = \sum_{k=1}^{i}\left[\frac{\left(j_n + \Delta j_n\right)\cdot\prod_{k=1}^{i}\frac{z_{1k}}{z_{2k}}}{\pi\cdot m_{вых}}\cdot\frac{z_{max}\cdot u_n}{z_{вых}}\right]. \qquad (15)$$

Выражая полученные по последней формуле значения бокового зазора в линейных единицах через число импульсов маховика, для диагностируемого объекта можно определить степень влияния величины износа боковой поверхности зубьев зубчатых колес на величину выходного сигнала и оценить исследуемую кинематическую цепь с точки зрения контролепригодности, выработав рекомендации по позиционированию первичных преобразователей бортовой системы диагностирования.

Приведенный математический аппарат был использован для анализа контролепригодности на базовых машинах МТЗ 2522 и МТЗ 1221. Машина МТЗ 2522 обладает 24 передачами переднего хода и 12 передачами заднего хода без учета ходоуменьшителя. В соответствии с кинематической схемой трансмиссии объекта диагностирования наибольший интерес представляют передачи, обладающие минимальными и максимальными значениями передаточных чисел. Крайние значения трансмиссионных диапазонов лимитируют значения диагностического параметра, что является исходной информацией для выработки рекомендаций по подбору количества входных датчиков, числа зубьев выходного зубчатого колеса, с которого снимается низкочастотный сигнал, и позиционированию первичных преобразователей.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

В соответствии с задачей исследования на языке высокого уровня разработан программный продукт Diagnost v1.0, позволяющий по кинематическим характеристикам трансмиссионных агрегатов зафиксировать величину диагностического параметра с различной величиной бокового зазора, определяемой номинальным боковым зазором и износом профилей зубьев зубчатых пар. В основу математического аппарата, используемого в программном продукте, положен пересчет линейной величины бокового зазора в количество опорных импульсов на один выходной импульс.

Программный продукт Diagnost v1.0 позволяет провести расчет и подобрать оптимальное положение и количество первичных преобразователей исходя из кинематической схемы объекта диагностирования.

Внешний вид программного модуля определяется путем формирования списка опытов и исходных данных для проводимых расчетов.

Закладка «журнал проведенных экспериментов» предназначена для формирования списка опытов по каждой передаче объекта диагностирования (рис. 2).

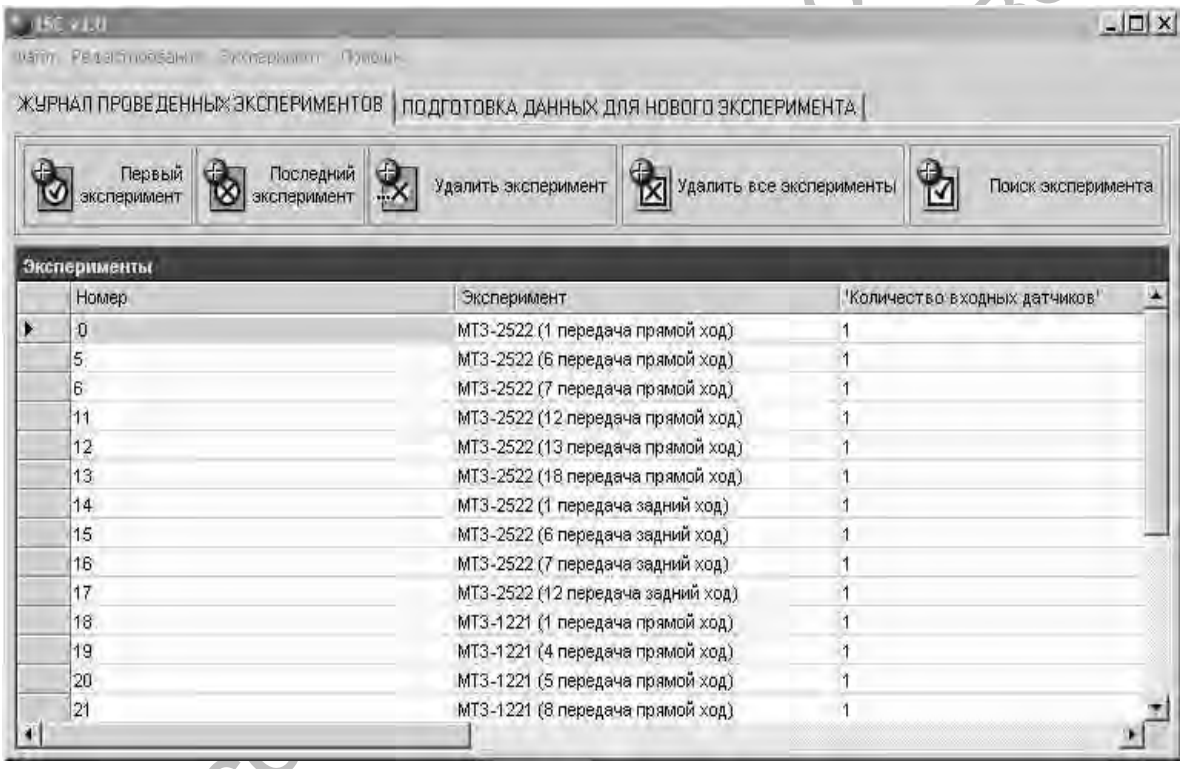

Рис. 2. Журнал проведенных экспериментов

Журнал включает наименование исследуемой передачи трансмиссии, количество входных датчиков, количество выходных датчиков, число зубьев выходного зубчатого колеса, число зубьев маховика и количество импульсов маховика, приходящихся на весь суммарный зазор как результат проведенного расчета. Функционал журнала проведенных экспериментов позволяет осуществить поиск, удаление результатов экспериментов, а также их перемещение по таблице сохраненных экспериментов.

Вторая закладка программного модуля, именуемая «подготовка данных для нового эксперимента» предна-

Белорусско-Российский университет

значена для формирования исходных параметров проводимого расчета и включает в себя задание и создание количества зубчатых ступеней в передаче, наименование передачи (рис. 3). Загрузка параметров передачи из базы необходима в случае, если будет проведен повторный расчет с измененными параметрами кинематической цепи передачи. Сохранение и удаление параметров кинематической цепи передачи необходимо при работе с базой данных, в которой хранятся результаты всех проведенных расчетов.

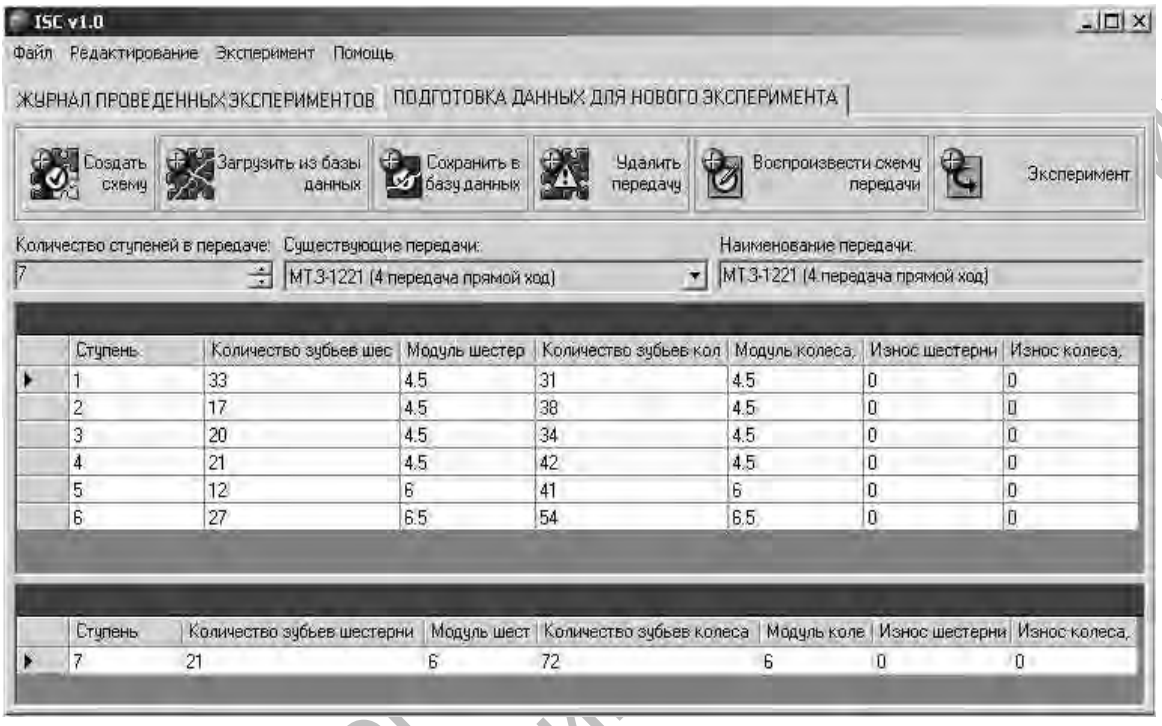

Рис. 3. Подготовка данных для нового расчета

Визуализация исследуемой кинематической цепи осуществляется с помощью функции воспроизведения схемы передачи по заданным параметрам. Проведение расчетов реализуется после активации функции «эксперимент». При этом задается имя данного расчета, количество входных датчиков, число зубьев маховика, число зубьев и модуль выходного зубчатого колеса. После проведения расчета его результаты принудительно сохраняются в базе данных. Программный продукт Diagnost v1.0 прошел тестирование при исследовании контролепригодности трансмиссий объектов МТЗ 2522, МТЗ 1221.

Результаты расчетов по кинематическим схемам базовых машин МТЗ 2522 и МТЗ 1221 с номинальными параметрами боковых зазоров приведены в табл. 1.

Как видно из предварительных расчетов, соответствующее номинальным величинам боковых зазоров объектов МТЗ 2522 и МТЗ 1221 количество импульсов не превышает 7.

Величины равномерного износа боковой поверхности зубьев с интервалом в 5 % (0…100 %) ресурса в пересчете на импульсы для МТЗ 1221 изменяются в диапазоне от 1 до 480 для 16, 1, 12 и 5 передач. Графическое отображение результатов эксперимента приведено на рис. 4.

Электронный архив Белорусско-Российского университета

Табл. 1. Расчеты по схеме МТЗ 2522 и МТЗ 1221 при номинальном зазоре

Передача МТЗ 2522	Количество импульсов маховика на зазор	Передача МТЗ 1221	Количество импульсов маховика на зазор
1, передний ход	4	1, передний ход	1
6, передний ход	4	4, передний ход	1
7, передний ход	7	5, передний ход	1
12, передний ход	7	8, передний ход	1
13, передний ход	7	9, передний ход	1
18, передний ход	7	12, передний ход	1
1, задний ход	5	13, передний ход	1
6, задний ход	5	16, передний ход	1
7, задний ход	5	1, задний ход	1
12, задний ход	5	4, задний ход	1
–		5, задний ход	1
–		8, задний ход	1

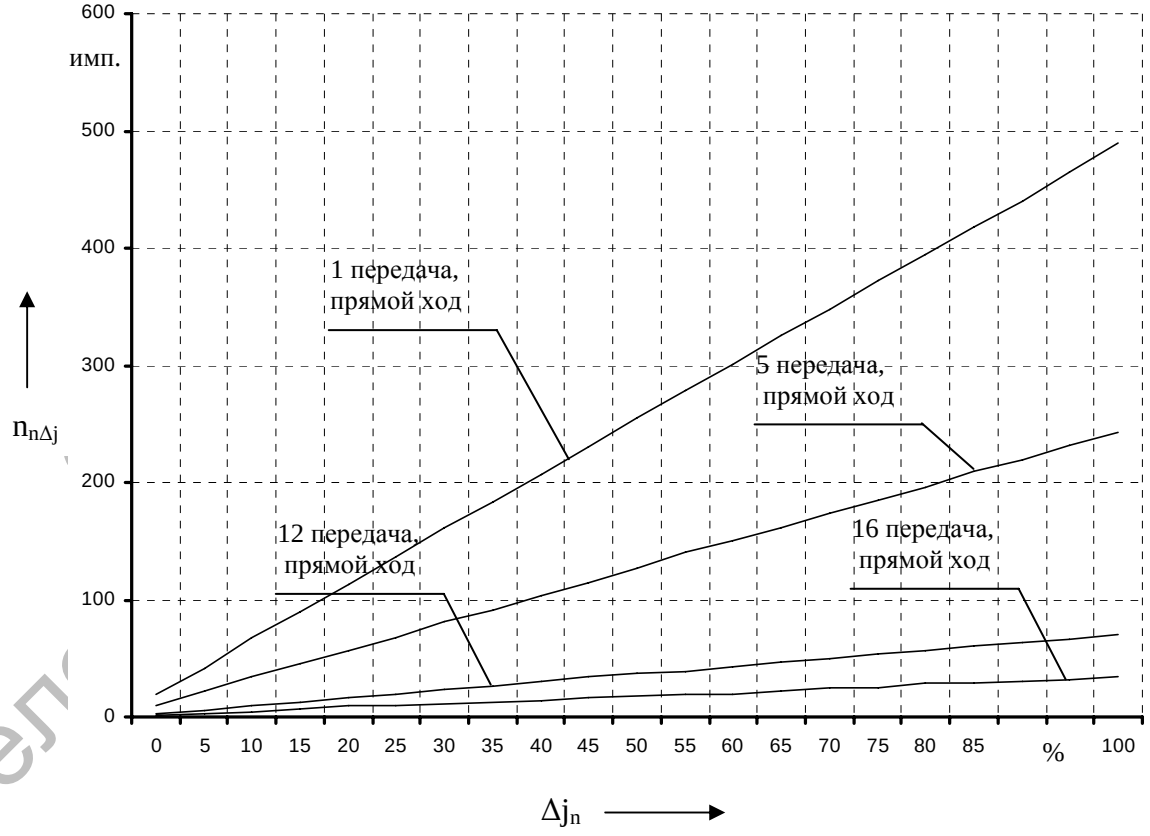

Рис. 4. Результаты расчетов по базовой машине МТЗ 1221

Белорусско-Российского университета библиотека

Контролепригодность объектов, находящихся на стадии проектирования, может быть оценена по кинематическим параметрам трансмиссии. По результатам оценки формируются рекомендации выбора параметров математического аппарата, т. е. z_{max}, $z_{вых}$, m_n, Δj_n, i, u_n, при соблюдении условия наибольшей информативности метода. Следует отметить, что параметр i определяет структуру математического аппарата в целом и зависит от места позиционирования выходного первичного преобразователя.

По результатам проведенных расчетов можно отметить, что величина контролируемого параметра увеличивается с возрастанием процента износа бокового профиля зубчатой передачи. Таким образом, обладая исходной информацией по каждой передаче и сопоставив ее с полученной в ходе диагностирования, можно зафиксировать процентную величину износа и спрогнозировать остаточный ресурс объекта диагностирования по лимитирующему элементу трансмиссии.

Результаты проведенных расчетов показали работоспособность предложенной методики диагностирования по приведенным объектам. Разработанный программный продукт позволяет на стадии проектирования базовой машины определить величины параметров диагностирования и места позиционирования выходных первичных преобразователей. Математический аппарат, использованный в программном продукте Diagnost v1.0, универсален и может быть применен для решения обратной задачи получения параметров источников опорного и выходного сигналов при установленных параметрах контролепригодности зубчатых зацеплений кинематической цепи объекта диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Антипенко, Г. Л.** Использование информационных технологий при диагностировании строительных машин / Г. Л. Антипенко, А. Н. Максименко, Б. М. Моргалик // Механизация строительства. – 2006. – № 2 – С. 6–9.

2. Выбор режимов тестового воздействия и прогнозирование работоспособности механических трансмиссий мобильных машин / А. Н. Максименко [и др.] // Механизация строительства. – 2006. – № 12 – С. 10–13.

3. **Максименко, А. Н.** Эксплуатация строительных и дорожных машин : учеб. пособие / А. Н. Максименко. – СПб. : БХВ-Петербург. – 2006. – 400 с.

Белорусско-Российский университет
УКПП «ИВЦ Облсельхозпрода»
Материал поступил 18.02.2008

**A. N. Maksimenko, B. M. Morgalik,
A. M. Dankov, V.V. Kutuzov**
Formation of the diagnostic variables of the estimation of transmissions operability when design vehicles

In this article the principles of formation of test-unit controlled variable on the basis of geometrical performances transmission chain are considered. The common approach of a quantitative estimation of diagnostic parameter is formalized. The controllability estimation of new vehicles' models by means of the developed software product has been conducted.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета