

ТРАНСПОРТ

УДК 629.114.2

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ И ТРАНСМИССИИ

В статье дано описание диагностического комплекса, реализующего импульсный способ диагностирования зубчатых зацеплений трансмиссий по параметрам суммарного углового зазора, описана экспериментальная установка для его испытаний, приведены результаты, подтверждающие эффективность метода. Представленные алгоритмы обработки сигналов первичных преобразователей позволяют проводить диагностику трансмиссий как на стационарных стендах, так и с помощью бортовых систем диагностики. Определены пути совершенствования диагностического комплекса.

Для реализации импульсного метода диагностирования зубчатых элементов трансмиссии по суммарному угловому зазору [1], а также для определения мощности двигателя по его разгонной характеристике 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

блок, 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. Функциональная схема диагностического комплекса приведена на рис. 1.

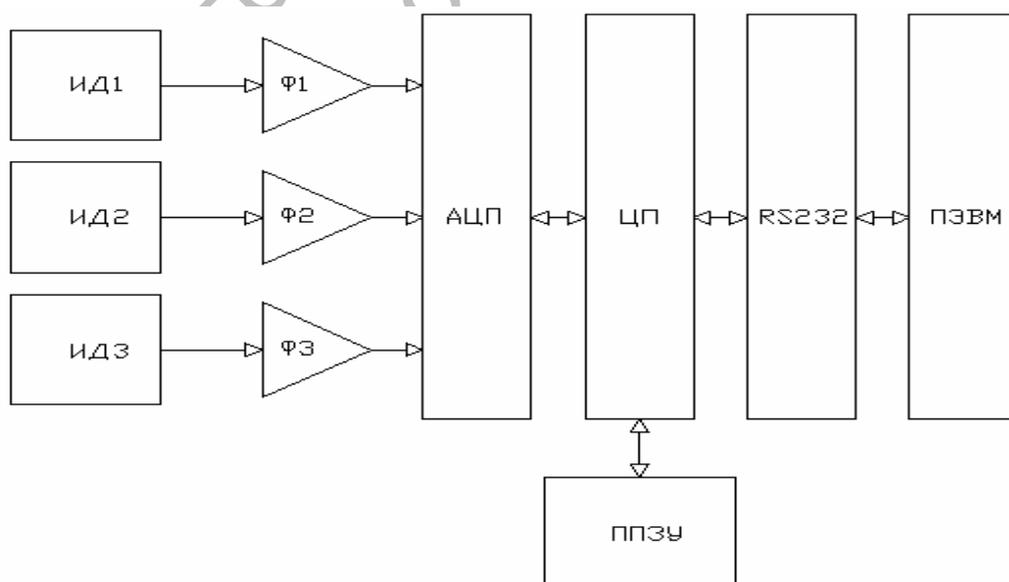


Рис. 1. Функциональная схема диагностического комплекса ДК-1

Схема содержит датчики ИД1, ИД2 опорного сигнала и датчик ИД3 выходного сигнала. В комплексе ДК-1 могут использоваться как индукционные датчики ПРП-2 ТУ 17МО.082.021, выдающие гармонический аналоговый сигнал напряжением 0...2,5 В, так и датчики ЭВИТ 42-08 с дискретным выходом. Индукторами для этих датчиков являются зубчатые венцы маховика двигателя и шестерни коробки передач, связанной с выходным валом.

Для преобразования аналогового сигнала индукционных датчиков в дискретный импульсный сигнал используются формирователи Ф1...Ф3, представляющие собой триггеры Шмидта. Обработка сигналов с датчиков центральным процессором (ЦП) предполагает преобразование дискретного сигнала в цифровой код. Для этого в данном комплексе применяется аналого-цифровой преобразователь (АЦП) NVL 26. АЦП управляется центральным процес-

сором согласно программе обработки сигналов датчиков. В указанной программе вначале осуществляется конфигурирование (программирование) двух каналов – входного и выходного (№ 1 и 3) АЦП. Датчики подключены к АЦП по дифференциальной схеме независимо друг от друга. Если амплитуда напряжения, выдаваемого датчиком, превышает 2,8 В, то его необходимо подключать через гасящий резистор.

Центральным процессором производится последовательный опрос каждого датчика из указанных каналов АЦП. В соответствии с рис. 2, если сигнал от датчика коробки передач U_2 превышает заданную наперед величину U_2^{\min} , а значит и некоторый код на выходе АЦП, который определяется половиной амплитуды сигнала данного датчика на минимальном скоростном режиме, то запускается счетчик импульсов датчика маховика N_1 .

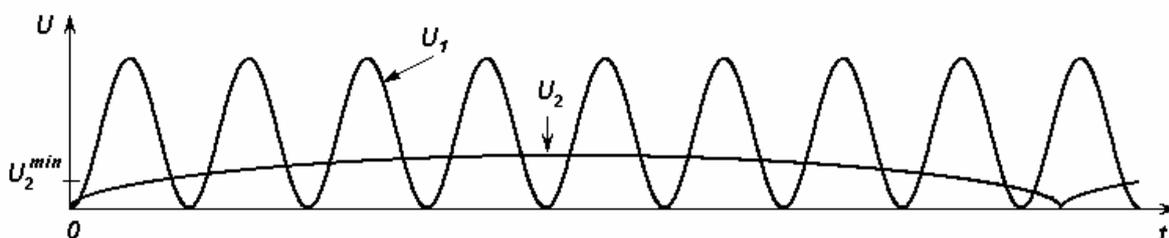


Рис. 2. Схема подсчета импульсов опорного сигнала в выходном импульсе

Эти импульсы подсчитываются так: если код на выходе канала № 1 АЦП, к которому подключен датчик маховика превышает наперед заданную величину, определяемую половиной амплитуды сигнала этого датчика на минимальном скоростном режиме U_1^{\min} , то к счетчику импульсов прибавляется единица. Затем производится считывание таймера ЦП. Данная информация, т. е. количество импульсов датчика маховика N_1 в одном импульсе другого датчика и значение времени, заносится в двумерный массив S энер-

гонезависимого перепрограммируемого запоминающего устройства (ППЗУ). Запоминающее устройство предназначено для длительного хранения результатов измерений. Максимальное число точек в массиве S составляет 4000.

Для передачи результатов измерений в память ПЭВМ по последовательной шине используется канал связи RS 232. Центральный процессор, АЦП, формирователи, ППЗУ и канал связи выполнены в виде отдельного микропроцессорного модуля.

Созданный диагностический комплекс (рис. 3) представляет собой аппаратную часть, выполненную на современной элементной базе с использованием персональной ЭВМ. Учитывая современный технический уровень ПЭВМ, основной упор при создании ДК-1 сделан на то, что наиболее важные и ответственные операции при обработке результатов и постановке

диагноза переданы ПЭВМ. Основу аппаратных средств составляет микропроцессорный модуль, который 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.



Рис. 3. Диагностический комплекс ДК-1

Передача ряда функций комплекса ПЭВМ обеспечивает быстрое получение больших объемов информации, ее обработку, хранение и представление в удобном для пользователя виде при существенной экономии времени, а также предусматривает возможность автоматизации основных операций. 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.

Разработанная микропроцессорная система, реализующая импульсный метод диагностирования, предназначена для решения широкого круга задач по оценке технического состояния элементов трансмиссии и двигателя. Глубина и точность анализа во многом определяется качеством сигналов первичной информации. В этой связи одной из задач экспериментальных исследований являлась оценка разрешающей способности метода при использовании в качестве опорного сигнала частотного выхода тахометра, индуктором для которого является зубчатый венец маховика двигателя.

Сложность решаемых задач определяется качеством программного обеспечения, которое может быть перенастроено в соответствии с решаемыми задачами и выполняется с помощью ПЭВМ. Подобный подход объясняется тем, что доработка программного обеспечения под новую задачу значительно дешевле, чем разработка и создание новых аппаратных

средств.

Экспериментальная проверка работоспособности диагностического комплекса ДК-1 проводилась при диагностике состояния зубчатых зацеплений коробки передач (КП) автомобиля ГАЗ-52, установленной на моторно-динамическом стенде (рис. 4) по параметрам суммарного углового зазора.

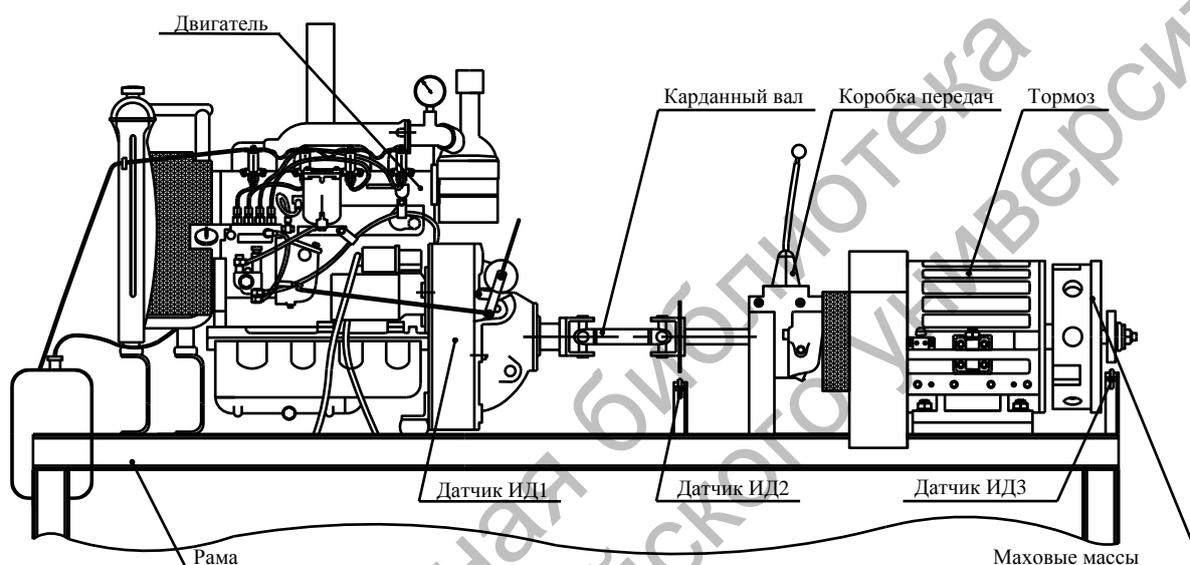


Рис. 4. Моторно-динамический стенд для диагностики коробки передач

Моторно-динамический стенд представляет собой последовательно соединенные: дизельный двигатель Д-50, напротив зубчатого венца маховика которого со 144 зубьями установлен датчик импульсов опорного сигнала Д1; коробка передач автомобиля ГАЗ-52, на первичном валу которой установлен датчик Д2; порошковый тормоз ПТ-250М с маховыми массами, имитирующими поступательное движение автомобиля, на выходном валу которого установлены шестерня с 38 зубьями и датчик зубцовой частоты выходного сигнала Д3.

Объектом диагностирования являлись двигатель Д-50 и коробка передач автомобиля ГАЗ-52, конструкция которой представлена на рис. 5. Определялся сум-

марный угловой зазор на первой и второй передачах. В первом случае он состоял из угловых зазоров зубчатых венцов первичного вала 1 с шестерней промежуточного вала 12, зубчатых венцов 7 и 5 (для второй передачи 4 и 9) и шлицевого соединения подвижной каретки шестерни 5 со вторичным валом 6. Кинематическая схема КП и стенда показана на рис. 6.

Целью экспериментальных исследований являлась отработка алгоритмов диагностирования двигателя по его разгонной характеристике и зубчатых зацеплений коробки передач импульсным методом по параметру суммарного углового зазора, а также оценка точности результатов.

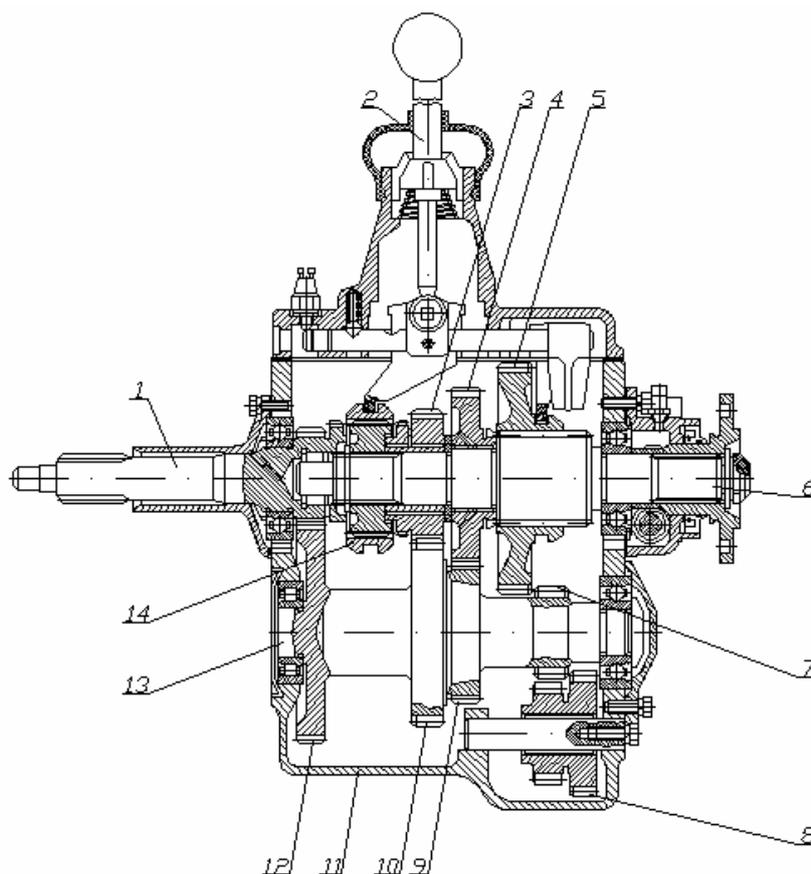


Рис. 5. Коробка передач ГАЗ-52: 1 – первичный вал; 2 – рычаг переключения передач; 3, 10 – шестерни третьей передачи; 4, 9 – шестерни второй передачи; 5, 7 – шестерни первой передачи и заднего хода; 6 – вторичный вал; 8 – блок шестерен заднего хода; 11 – картер; 12 – шестерня привода промежуточного вала; 13 – промежуточный вал; 14 – муфта

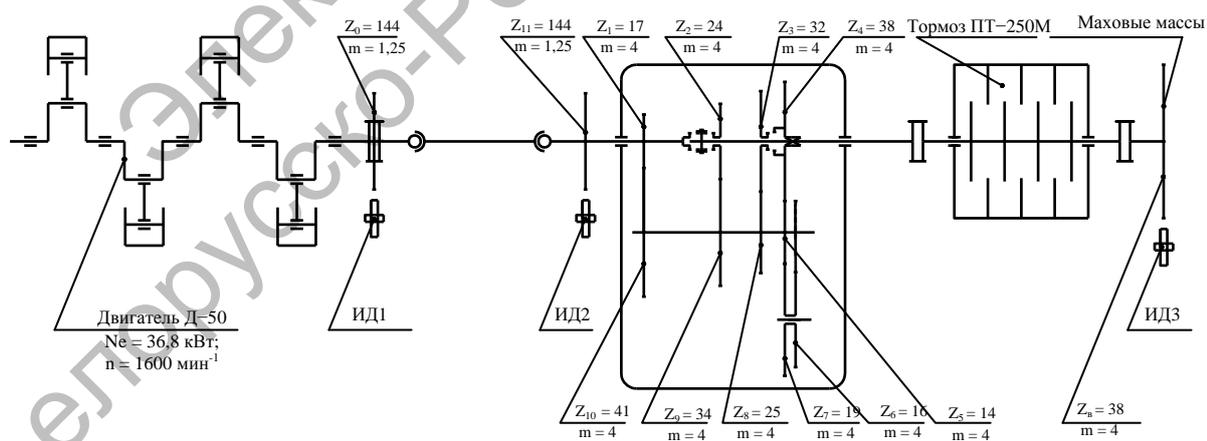


Рис. 6. Кинематическая схема стенда и коробки передач ГАЗ-52

При диагностировании КП важную роль играет вид тестового воздействия на трансмиссию, от которого зависит алгоритм обработки полученных результатов и точность определения суммарного углового зазора.

Согласно результатам расчетно-теоретических исследований [2] суммарный угловой зазор выбирается не на одном импульсе выходного сигнала, а на нескольких. Из-за этого определение суммарного углового зазора можно проводить по двум алгоритмам:

1) для выбора суммарного углового зазора в зубчатых зацеплениях используется тестовое воздействие в виде торможения двигателем. Для этого двигатель выводится на установившийся режим, когда в зубчатых зацеплениях КП выбираются зазоры одного направления, после чего производится резкий сброс педали подачи топлива, т. е. торможение двигателем. В этот период силы инерции будут превышать крутящий момент двигателя и способствовать выбору зазоров другого направления. Подсчитав общее число импульсов опорного сигнала за переходный процесс и вычтя число импульсов опорного сигнала за тот же период, но при установившемся режиме, находят разницу, характеризующую суммарный угловой зазор в трансмиссии. Соотнеся эту разницу с числом зубьев маховика двигателя, выдающего 144 импульса опорного сигнала за один оборот, определяют величину суммарного углового зазора;

2) используется тестовое воздействие на трансмиссию вида «торможение–разгон двигателя». Этот вид тестового воздействия позволяет дважды определить суммарный угловой зазор: и на этапе торможения двигателем, и на этапе его разгона. В этом случае и подсчет импульсов ведется в два этапа: на стадии торможения находится отрицательная разница; на этапе разгона – положительная, относительно установившегося режима работы.

Мощность двигателя определялась на фазе разгона второго тестового воздей-

ствия. Для этого на каждом периоде выходного сигнала определялась угловая скорость ω_i , а ее приращение $\Delta \omega_i$, соотнесенное к промежутку времени ее изменения, дает величину углового ускорения ε_i , по которому по известной зависимости [3] определялось текущее значение мощности двигателя:

$$N_i = J \omega_i \varepsilon_i, \quad (1)$$

где J – приведенный к коленчатому валу двигателя момент инерции вращающихся масс, связанных с коленчатым валом.

Экспериментальная установка для испытания диагностического комплекса ДК–1 показана на рис. 7. Перед началом испытаний проводилось определение суммарного углового зазора на первой и второй ступенях коробки передач инструментальным методом с помощью люфтомера КИ–13909 ТУ 70.0001.959–82. Датчики подключались к микропроцессорному модулю, а сам модуль – через блок питания в сеть.

Задавая настройки для диагностирования коробки передач с помощью настроечного меню и функции выбора, запускали двигатель, включали первую передачу и с установившегося скоростного режима двигателя диагностическим комплексом производилась запись информации с датчиков в течение 7 с, за которые проводилось торможение двигателем. По окончании записи задавалось имя файла и ДК–1 выводился в режим ожидания.

Аналогично проводились испытания с тестовым режимом «торможение–разгон двигателя». После окончания измерений данные из микропроцессорного модуля передаются в компьютер. Базы данных имеют: название файла, вид испытаний, номер ступени КП, количество датчиков информации, количество зубьев задатчика опорного сигнала ($Z_0 = 144$) и выходной шестерни ($Z_6 = 38$) и массивы данных измерений – количество опорных импульсов в одном импульсе вы-

ходного сигнала N_i , количество выходных импульсов m и длительность каждого выходного импульса в течение всего времени

диагностирования t_i , которое составляло 7 с.

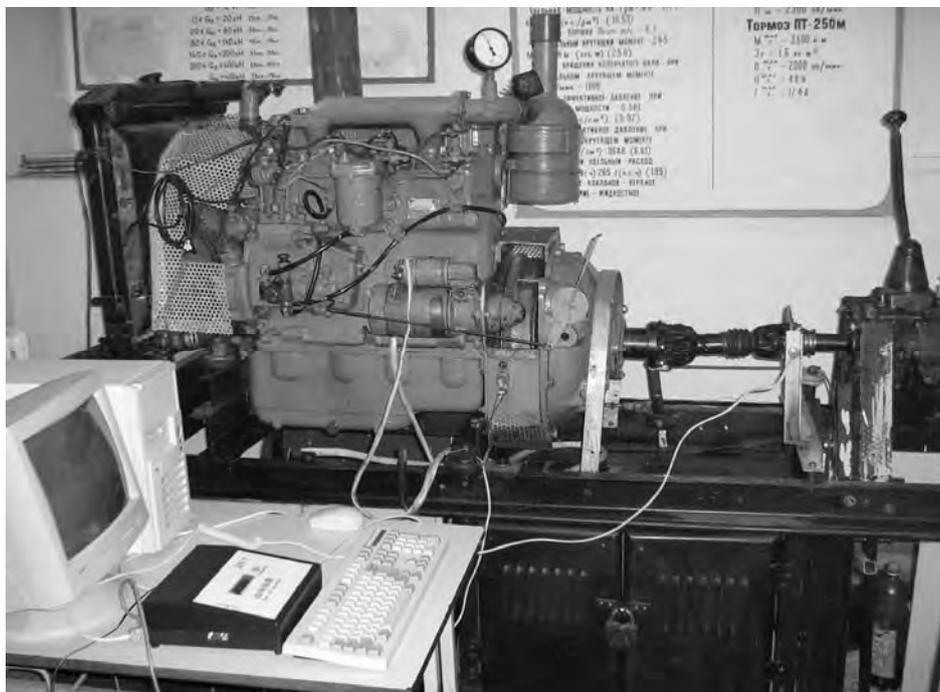


Рис. 7. Экспериментальная установка

Результаты диагностирования на экране ПЭВМ отображаются в виде окна с исходными данными, результатами диагностики и графиками, позволяющими контролировать вид 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. 8).

На основании анализа массивов данных первичной информации определяются:

1) действительное передаточное число на каждой ступени коробки передач. Оно определяется как отношение количества импульсов опорного сигнала N_i , подсчитанных за m импульсов выходного сигнала к Z_0 . Это число оборотов на входе КП за m импульсов. За этот период выходной вал повернется на m/Z_0 оборотов.

Их отношение и дает действительное передаточное число ступени в КП:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^m N_i \cdot Z_B}{Z_0 \cdot m} = \frac{\sum_{i=1}^m N_i \cdot 38}{144 \cdot m}.$$

Действительное передаточное число определяется на установившемся режиме и заносится в соответствующее окно экрана ПЭВМ;

2) частота вращения маховика двигателя. Для уменьшения погрешности расчет частоты вращения маховика проводился по 10 точкам. В этом случае погрешность составит

$$\Delta n = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{CP}} \cdot 10\% ,$$

а частота вращения n_i , мин⁻¹, маховика

двигателя по 10 точкам определяется из выражения

$$n_i = \frac{\sum_{i=1}^{10} N_i \cdot 60}{144 \cdot \sum_{i=1}^{10} t_i};$$

3) суммарный угловой зазор в коробке передач при тестовом воздействии на трансмиссию вида «торможение двигателем» с установившегося скоростного режима до его полной остановки.



Рис. 8. Отображение на экране монитора результатов диагностики при тестовом воздействии вида «торможение двигателем»

Выбор суммарного углового зазора в КП осуществляется на участке падения частоты вращения двигателя, когда момент инерции маховых масс превышает момент двигателя. Суммарный угловой зазор определяется из выражения

$$\Delta \varphi_1 = \frac{\sum_{i=1}^m N_i - N_{CP1}(m - 1)}{Z_0} \cdot 360;$$

4) суммарный угловой зазор в коробке передач при тестовом воздействии на трансмиссию вида «торможение–разгон двигателем».

При этом тестовом воздействии выбор суммарного углового зазора в КП

происходит дважды – при торможении двигателем и при разгоне (рис. 9). Поэтому расчет суммарного углового зазора осуществляется из выражений:

$$\Delta \varphi_1 = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} N_i - N_{CP1}(m_1 - 1)}{Z_0} \cdot 360;$$

$$\Delta \varphi_2 = \frac{\sum_{i=m_1}^{m_2} N_i - N_{CP1}(m_2 - m_1 - 1)}{Z_0} \cdot 360,$$

где m_1, m_2 – количество импульсов за период торможения двигателем и за период разгона;

5) текущая мощность двигателя

определялась по выражению (1). Угловое ускорение определялось как 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 $\Delta\omega$, рад/с, найдется из выражения

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



Рис. 9. Отображение на экране монитора результатов диагностики при тестовом воздействии вида «торможение–разгон двигателем»

Угловое ускорение ε_i , рад/с², можно отслеживать постоянно, анализируя длительность соседних импульсов выходного сигнала датчика ДЗ (см. рис. 4) по зависимости

$$\varepsilon_i = 4\pi / Z_e ((T_i - T_{i+1}) / (T_i \cdot T_{i+1}(T_i + T_{i+1}))).$$

Результаты обработки экспериментальных данных по определению суммарного углового зазора на первой и второй ступенях КП сведены в табл. 1. Анализируя результаты экспериментальных исследований можно констатировать, что диагностический комплекс ДК-1, реализующий импульсный метод диагностики зубчатых зацеплений, позволяет оцени-

вать техническое состояние трансмиссий по параметрам суммарного углового зазора в зубчатых зацеплениях с достаточно высокой погрешностью, зависящей от типа тестового воздействия.

При подсчете импульсов за все время переходного процесса при тестовом воздействии вида «торможение двигателем» цена ошибки подсчета в один импульс, связанная с округлением дробной части, при подсчете около 5000 импульсов достаточно велика. Так, при 144 импульсах за один оборот маховика двигателя, являющегося генератором опорного сигнала, погрешность измерения суммарного углового зазора, связанная с дискретным подсчетом числа

импульсов, будет составлять

$$\Delta\varphi = \frac{1}{144} \cdot 360^\circ = 2,5^\circ.$$

При искомом зазоре $6,75^\circ$ эта ошибка существенна и составляет 37 %. Это видно по результатам эксперимента (см. табл. 1). На первой передаче округление сказалось на увеличении результата, а на второй передаче – на уменьшении. При тестовом воздействии вида «торможение–разгон» первая фаза мало отличается

от предыдущего тестового воздействия, а во второй фазе при резком нагружении двигателя показания по суммарному угловому зазору существенно завышены. Это можно объяснить большой величиной крутящего момента при разгоне двигателя, при котором происходит деформация пружин демпфера крутильных колебаний в ведомом диске сцепления, которая воспринимается системой диагностики как составляющая суммарного углового зазора.

Табл. 1. Результаты обработки экспериментальных данных

Параметры		Первая передача	Вторая передача
Действительное передаточное число U		6,39	3,1
Среднее число опорных импульсов N_{CP} в одном выходном импульсе		24,215	11,683
Суммарный угловой зазор, определенный инструментальным методом (угломером КИ–13909)		$6,75^\circ$	9°
Суммарный угловой зазор, определенный диагностическим комплексом ДК–1 при тестовом воздействии вида «торможение двигателем»		$9,3^\circ$	$7,6^\circ$
Суммарный угловой зазор, определенный диагностическим комплексом ДК–1 при тестовом режиме «торможение–разгон двигателем» за время переходного процесса	на участке торможения	$9,5^\circ$	$7,5^\circ$
	на участке разгона	12°	$12,2^\circ$

Для снижения погрешности измерения суммарного углового зазора необходимо увеличить разрешающую способность метода за счет повышения частоты опорного сигнала. Техническая возможность для этого имеется – это датчики углового положения вала – энкодеры, генерирующие, в зависимости от модели, до 3000 импульсов за один оборот входного вала. Но в этом случае надо существенно повышать быстродействие порта датчика микропроцессорного модуля. Кроме того, погрешность измерения зависит от места установки датчика опорного сигнала, характера и величины тестового воздействия. В частности, при установке датчика

опорного сигнала напротив зубчатого венца маховика двигателя, при тестовом воздействии вида «торможение двигателем» получают более стабильные результаты измерений суммарного углового зазора. При использовании тестового воздействия вида «торможение–разгон» наличие упругого демпфера крутильных колебаний одностороннего действия после датчика опорного сигнала, работающего на сжатие при набросе нагрузки на двигатель, существенно завышается результат измерения суммарного углового зазора. В этом случае датчик опорного сигнала целесообразно перенести за

демпфер, т. е. на первичный вал коробки передач, или не пользоваться этим видом тестового воздействия.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали возможность создания компьютерных средств диагностирования двигателей, трансмиссий и направления развития их как в плане повышения точности, так и расширения возможностей для углубленного диагностирования состояния зубчатых зацеплений и других элементов трансмиссий.

G. L. Antipenko, V. A. Sudakova, V. V. Kutuzov
Experimental researches of engine and transmission of diagnosing pulse system
Belarusian-Russian University

In the article the description of the diagnostic complex realizing a pulse way of diagnosing of tooth gearings of transmissions on parameters of a total angular backlash is given, experimental installation for its tests is described, the results confirming efficiency of the method are given. The presented signal processing algorithms of primary converters allow carrying out diagnostics of transmissions, both at stationary test benches, and by means of diagnostic onboard systems. Ways of diagnostic complex perfection have been defined.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 9279 РБ, С1 G 01 М 13/02. Способ диагностирования зубчатых зацеплений механических передач / Г. Л. Антипенко [и др.] (РБ). – № а20040773 ; заявл. 02.07.02 ; опубл. 30.03.05. – 4 с. : ил.

2 **Судакова, В. А.** Новые технологии диагностирования зубчатых зацеплений трансмиссий машин / В. А. Судакова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 2. – С. 23–32.

3 **Макаров, Р. А.** Диагностика строительных машин / Р. А. Макаров, А. В. Соколов. – М. : Стройиздат, 1984. – 335 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 16.11.2007