

# Телеметрическая система для дорожных испытаний автомобильных трансмиссий

Анатолий Ярусов, Тимофей Тенюшко, Дмитрий Швец

Описаны технические и программные средства системы для дорожных испытаний автомобильных трансмиссий. Первичная информация снимается с тензометрических датчиков, установленных на вращающихся полуосях. Данные, полученные после усиления сигналов и преобразования в цифровую форму, передаются по радиоканалам Bluetooth в кабину, где регистрируются на флэш-диске, а затем вводятся в ноутбук.

## ВВЕДЕНИЕ

В многостадийном процессе разработки и создания новых автомобилей существенное место занимают дорожные испытания. Задачей этих испытаний является экспериментальное определение технических характеристик автомобилей в реальных условиях эксплуатации. Для проведения исследований прочности и надёжности трансмиссий автомобилей с целью дальнейшего совершенствования их конструкции и технологии изготовления необходимо иметь автоматизированную измерительную систему на базе современных компьютерных и микропроцессорных средств. Такая система разработана сотрудниками Объединённого института машиностроения Национальной академии наук Республики Беларусь и НИИ средств автоматизации ГНПО «Агат».

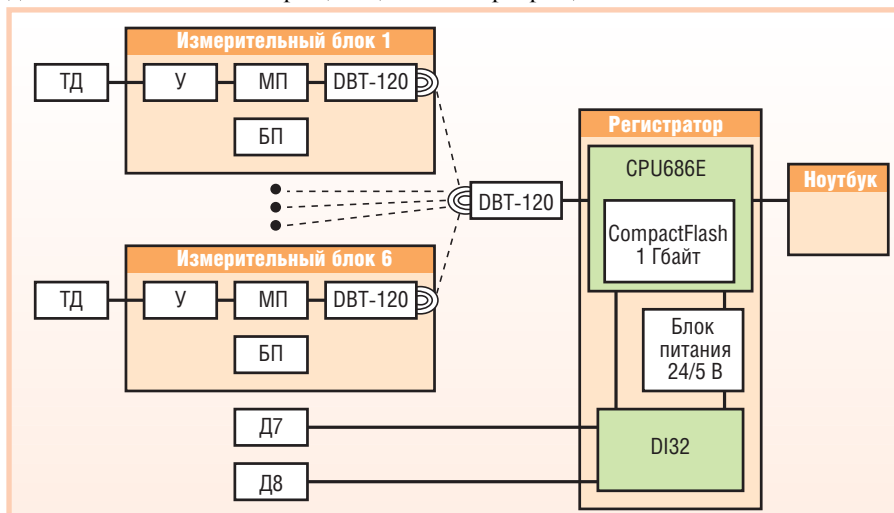
Испытательное оборудование обычно содержит датчики, средства преобразования и измерения сигналов, средства передачи, накопления и обработки данных.

Механические трансмиссии, широко применяемые на современных грузовых и легковых автомобилях, содержат вращающиеся детали и узлы: карданные валы, полуоси, шестерни и т.д. При испытаниях прочности и надёжности таких трансмиссий возникает проблема съёма сигналов с датчиков, установленных на вращающихся деталях, для последующего их измерения и обработки на компьютере. Применен-

ные токосъёмники в виде скользящих контактных устройств имеет большие недостатки: они изнашиваются, при дорожных вибрациях в измерительных каналах создают помехи, от которых в дальнейшем трудно избавиться. Альтернативой таким решениям является применение беспроводных систем, обеспечивающих передачу данных от вращающихся датчиков до компьютера по радиоканалам.

Другая проблема состоит в необходимости накопления больших объёмов экспериментальных данных. Компьютер (ноутбук) с накопителем данных на жёстком вращающемся

диске (винчестере) не может обеспечить надёжность работы в условиях вибраций, возникающих при движении автомобиля. Необходим промежуточный регистратор данных, реализованный на базе твердотельного флэш-диска. При таком решении ноутбук, находящийся в кабине автомобиля, включается только после окончания цикла измерений, то есть при остановленном автомобиле в отсутствие вибраций. После ввода полученных данных с флэш-диска в ноутбук и оперативной их обработки принимается решение о продолжении или прекращении испытаний.



Условные обозначения: ТД — тензометрический датчик; У — усилитель; МП — микропроцессор с аналого-цифровым преобразователем; БП — батарея питания; DBT-120 — радиоадаптер Bluetooth; Д7 — датчик скорости вращения коленвала дизеля; Д8 — датчик скорости автомобиля; CPU686E — центральный процессорный блок; DI32 — модуль ввода дискретных сигналов.

Рис. 1. Структурная схема телеметрической системы для дорожных испытаний автомобильных трансмиссий

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ

На рис. 1 представлена структурная схема телеметрической системы для дорожных испытаний автомобильных трансмиссий.

Первичная информация о крутящих моментах и деформациях полуосей ведущих мостов получается с помощью тензодатчиков (ТД). В зависимости от колёсной формулы автомобиля количество ТД может изменяться от двух до шести. Сигналы тензодатчиков поступают в соответствующие измерительные блоки, которые установлены на ступицах колес и вращаются совместно с испытываемыми полуосями.

В каждом измерительном блоке имеется тензометрический усилитель (У), микропроцессор (МП) с аналого-цифровым преобразователем и адаптер Bluetooth DBT-120. Питание измерительных блоков производится от батарейного блока (БП). Цифровые данные по радиоканалам через приёмный адаптер DBT-120 поступают в регистратор, выполненный на базе процессорного модуля CPU686E (фирма Fastwel, формат MicroPC), и записываются на флэш-диск ёмкостью 1 Гбайт.

Кроме основных шести тензодатчиков, в системе имеются ещё два дополнительных датчика, сигналы которых характеризуют условия проведения испытаний: Д7 – для измерения скорости вращения коленвала дизеля и Д8 – для измерения скорости автомобиля (спидометр). Импульсные сигналы с этих датчиков вводятся через модуль DI32 (фирма Fastwel, формат MicroPC), связанный с CPU686E через шину ISA. Измеренные периоды сигналов также регистрируются на флэш-диске.

Питание регистратора производится от бортовой сети автомобиля напряжением 24 В, которое преобразуется в напряжение 5 В.

После общей характеристики телеметрической системы переходим к более подробному описанию её отдельных блоков.

### ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Тензометрический усилитель выполнен на базе микросхемы AD623 Analog Devices. Схема усилителя представлена на рис. 2.

Питание тензодатчика производится стабилизированным напряжением +3,3 В. Для ограничения предельного тока от батарейного источника пита-

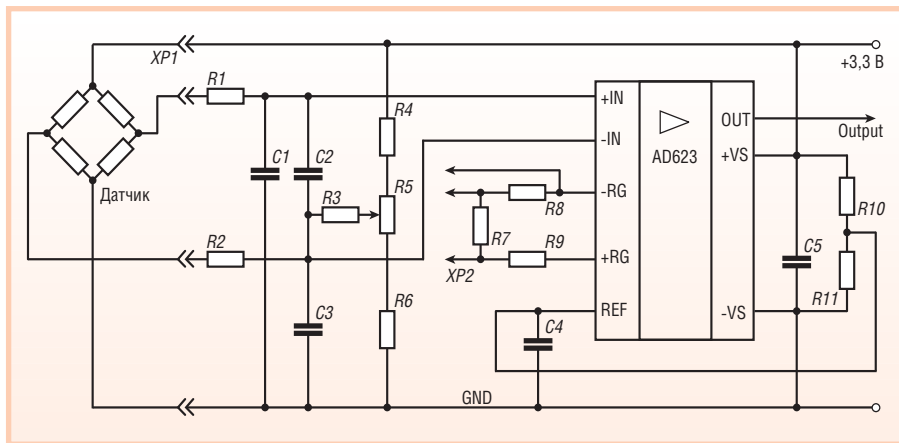


Рис. 2. Схема тензометрического усилителя

ния сопротивления тензорезисторов, включённых по схеме моста, должны быть не менее 200 Ом, а при использовании полумоста – не менее 100 Ом. В этих случаях ток через датчик не будет превышать 16,5 мА.

Резисторы R1 и R2 и конденсаторы C1...C3 во входных цепях измерительного блока служат для фильтрации помех, которые могут навестись на тензодатчике и подводящих проводах. С помощью переменного резистора R5 производится балансировка датчика, то есть компенсация разброса параметров установленных тензорезисторов.

С целью повышения стабильности параметров измерительного тракта при воздействии вибраций на выходе переменного резистора R5 установлен RC-фильтр из резистора R3 и конденсаторов C2, C3. Для обеспечения точности и температурной стабильности параметров в измерительном блоке используются проволочные прецизионные резисторы с погрешностью номиналов 0,1%.

Микросхема усилителя AD623 имеет следующие характеристики:

- диапазон питающих напряжений от +2,7 до +12 В (однополярное питание);
- потребляемый из источника питания ток 0,55 мА, входной ток 25 нА;
- при коэффициенте усиления 100 полоса частот простирается от нуля до 100 кГц;
- температурный диапазон от -40 до +85°C.

Коэффициент усиления G может быть задан в пределах от 1 до 1000 в зависимости от единственного внешнего резистора RG, включаемого между выводами 1 и 8, и рассчитывается по формуле:

$$G = 1 + \frac{100 \text{ (кОм)}}{R_G \text{ (кОм)}}$$

Для уменьшения влияния вибраций на коэффициент усиления резистор RG выполнен не в виде переменного резистора, а составлен из трёх постоянных резисторов R7, R8, R9 с номиналами 300, 200 и 100 Ом. Выбор необходимого коэффициента усиления производится установкой переключек на разъёме XP2. В таблице 1 приведены возможные значения коэффициента усиления G в зависимости от суммарного сопротивления резисторов R7, R8, R9.

Дифференциальный усилитель AD623 предназначен для усиления разностного сигнала U23 на входных ножках 2 и 3. При входном сигнале U23 = 0 выходной сигнал на ножке 6 обычно также равен нулю (U6 = 0). При нагружении тензодатчика входной сигнал U23 может оказаться как положительным, так и отрицательным. Это должно было бы создать на выходе усилителя соответствующие разнополярные сигналы. Но получение отрицательных напряжений U6 < 0 невозможно, так как усилитель AD623 имеет однополярное питание напряжением +3,3 В. Поэтому на дополнительный вход усилителя (ножка 5) подано напряжение

Таблица 1

Зависимость коэффициента усиления G от суммарного сопротивления резисторов R7, R8, R9

Суммарное сопротивление резисторов R7, R8, R9 (Ом)	Коэффициент усиления G
300 + 200 + 100 = 600	167,7
300 + 100 = 400	251
200 + 100 = 300	334,3
100	1001

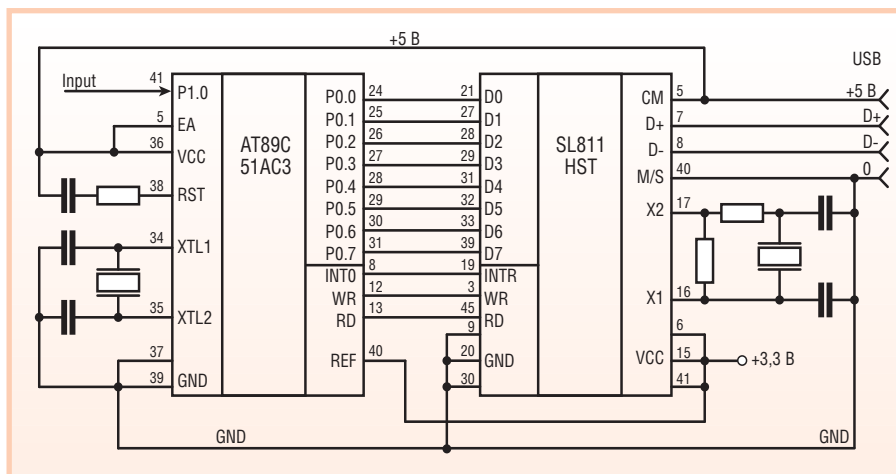


Рис. 3. Схема сопряжения микропроцессора и микроконтроллера

смещения  $U_5 = +1,65$  В, которое получено путём деления на 2 напряжения  $+3,3$  В резисторами  $R_{10}$  и  $R_{11}$ . В результате указанного смещения на ножке 5 нулевому сигналу на дифференциальных входах 2 и 3 усилителя ( $U_{23} = 0$ ) соответствует на выходной ножке 6 сигнал  $U_6 = +1,65$  В. При знакопеременном сигнале  $U_{23}$  со средней нулевой составляющей на выходе 6 будет сигнал  $U_6 = +1,65 \pm \Delta U_6$ , где  $\Delta U_6 = GU_{23}$ . Общий диапазон напряжений на выходе 6 находится в пределах от нуля до  $+3,3$  В, что соответствует входному динамическому диапазону напряжений используемого далее аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

### МИКРОПРОЦЕССОР

В качестве основного средства управления в измерительном блоке выбран микропроцессор AT89C51AC3 фирмы Atmel, имеющий следующие основные характеристики:

- разрядность 8 бит, быстродействие 20-60 МГц;
- ОЗУ 256-2048 байт;
- флэш-память 64 байт;
- три 16-битовых таймера-счётчика;
- 10-разрядный АЦП с диапазоном входных напряжений от 0 до  $+3,3$  В;
- напряжение питания 3,0...5,5 В;
- температурный диапазон от  $-40$  до  $+85^\circ\text{C}$ .

Как видно из схемы, представленной на рис. 2, питание тензодатчика и усилителя производится от общего стабилизированного источника напряжением  $+3,3$  В. Это же напряжение используется в качестве опорного (REF) для АЦП в микропроцессоре AT89C51AC3. Такая схема обеспечивает повышенную точность измерений, так как возможные колебания напряжения  $+3,3$  В и соответствующие изменения анало-

говых сигналов компенсируются изменениями динамического диапазона АЦП, не отражаясь на полученных цифровых данных.

Программное обеспечение микропроцессора AT89C51AC3 реализует следующие основные функции:

- управление аналого-цифровым преобразователем (период опроса датчика 1 мс, разрядность 10 бит);
- накопление результатов измерений в буфере ёмкостью 256 байт (128 двухбайтовых слов);
- управление передачей пакетов данных из измерительного блока в регистратор данных (рис. 1) по радиоканалу с помощью аппаратуры Bluetooth (адаптеров DBT-120).

### МИКРОКОНТРОЛЛЕР

Для вывода данных из микропроцессора AT89C51AC3 в адаптер DBT-120 Bluetooth по интерфейсу USB используется микроконтроллер SL811HST фирмы Sургess. Схема сопряжения микропроцессора и микроконтроллера представлена на рис. 3.

Микроконтроллер SL811HST имеет следующие основные характеристики:

- функция ведущего или ведомого контроллера USB 1.1 с программным управлением, поддержка низкой (1,5 Мбит/с) и полной (12 Мбит/с) скорости передачи данных;
- двунаправленный 8-битовый порт ввода-вывода, поддерживающий DMA в ведомом режиме;
- 256-байтовый внутренний SRAM-буфер, работающий в режиме приёма-передачи;
- совместимый с 5-вольтовой логикой интерфейс;
- питание напряжением 3,3 В.

По существу, микроконтроллер SL811HST представляет собой мост, не

имеющий своей памяти для программы, поэтому для него требуется внешнее управление, которое обеспечивает микропроцессором AT89C51AC3 по 8-разрядной шине передачи данных. Разъём USB, показанный на рис. 3, предназначен для подключения адаптера DBT-120 Bluetooth, обеспечивающего пакетную передачу данных по радиоканалу.

### БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ (СТАНДАРТ BLUETOOTH)

Как было указано в разделе «Введение», особенность описываемой телеметрической системы для испытаний трансмиссий состоит в использовании беспроводной передачи данных от датчиков, установленных на вращающихся полуосях, в регистратор, находящийся в кабине автомобиля. Для этой цели применяются (рис. 1) семь адаптеров DBT-120 Bluetooth фирмы D-Link, образующих локальную радиосеть Piconet. Адаптер имеет свой микропроцессор с готовым программным обеспечением, приёмник и передатчик сигналов, встроенную антенну. Используемый частотный диапазон сети от 2,402 до 2,480 ГГц разбит на 78 каналов. Модули Bluetooth работают тактами (слотами) длительностью 625 мкс. Каждому модулю в пределах каждого такта назначается соответствующий частотный канал и режим передачи или приёма.

Адаптер DBT-120, подключённый к регистратору данных, исполняя роль ведущего в сети Piconet, назначает шести адаптерам измерительных блоков персональные частотные каналы и времена для передачи или приёма. Частотное и временное разделение каналов позволяет исключить конфликтные ситуации в сети Piconet.

В каждом такте приёма-передачи длительностью 625 мкс адаптеры DBT-120 имеют возможность передать пакет фиксированного формата, содержащий служебную информацию и передаваемые данные. Служебная информация имеет 72-разрядный код доступа, обеспечивающий, в частности, синхронизацию устройств, 54-разрядный заголовок пакета, содержащий контрольную сумму пакета и информацию о его параметрах. Поле для записи пересылаемых данных может иметь от 0 до 2745 бит.

В нашей системе данные, пересылаемые из буфера измерительного блока в

регистратор, могут иметь размер до 256 байт. Большие пакеты, размер которых может достигать 64 кбайт, передаются путём предварительного сегментирования. Процедуры сегментирования передаваемого большого пакета и обратной сборки принятых сегментов реализуются автоматически с помощью программных средств адаптеров DBT-120.

Скорость передачи данных в сети Piconet зависит от режима работы и может изменяться от 57,6 до 721 кбит/с.

### ПИТАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА

Питание измерительного блока производится от пяти батареек типа AA напряжением по 1,5 В фирмы Duracell или Energizer, которые имеют ёмкость 2,85 А·ч и гарантийный срок хранения 5-7 лет.

Начальное напряжение пяти батареек равно примерно 7,5 В. Поскольку в процессе эксплуатации это напряжение снижается, то для получения требуемых стабильных напряжений 5,0 и 3,3 В используются последовательно включённые стабилизаторы TC55RP50 и TC55RP33. Такая схема включения обеспечивает повышенную стабильность напряжения 3,3 В, используемого для питания аналоговой части системы и в качестве опорного напряжения АЦП. Кроме того, пониженное входное напряжение стабилизатора TC55RP33 (5 В вместо 7,5 В) уменьшает потери мощности на самом стабилизаторе.

Экспериментально установлено, что измерительный блок потребляет в среднем 60 мА, совместно с тензодатчиком из батарейного источника потребляется ток 75 мА.

Ёмкость, отданная батареей при разрядном токе  $I_p$  за время  $T_p$  в пределах допустимого разряда, вычисляется по формуле:

$$C_T = I_p \cdot T_p$$

Для химических источников тока (ХИТ) номинальная ёмкость, гарантируемая заводом-изготовителем (в на-

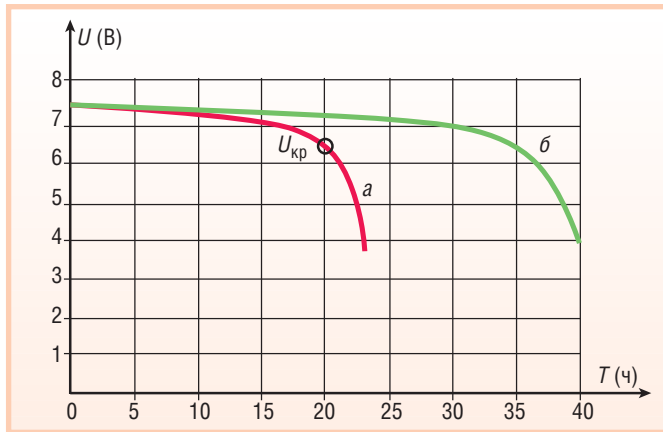


Рис. 4. Изменение напряжения батарейного питания при постоянном разрядном токе: а – ток разряда 142,5 мА; б – ток разряда 75 мА

шем случае 2,85 А·ч), представляет собой ёмкость, которую ХИТ может отдать в течение 20 часов током, численно равным 5% от номинальной ёмкости:

$$C_{ном} = 0,05 \cdot |C_{ном}| \cdot 20,$$

где  $|C_{ном}|$  — разрядный ток (А), численно равный значению номинальной ёмкости.

После отдачи ёмкости  $C_{ном}$  напряжение на ХИТ должно остаться не менее критического ( $U_{кр}$ ), которое для различных ХИТ может отличаться, но примерно равно 0,85 от начального напряжения (напряжения заряженного ХИТ).

На рис. 4 график показывает изменение напряжения батарейного источника питания измерительного блока от начального напряжения 7,5 В до  $U_{кр} = 6,4$  В при 5-процентном токе  $I_p = 0,05 \cdot |2,85| = 142,5$  мА.

В измерительном блоке фактический ток из батарейного источника равен 75 мА, что составляет 2,6% от числа 2,85. Поэтому разряд источника будет происходить по кривой б и достигнет

напряжения  $U_{кр} = 6,4$  В примерно за 35 часов.

Экспериментально установлено, что измерительные блоки системы работают при минимальном напряжении 3,6 В, что существенно ниже  $U_{кр}$ .

Исходя из сказанного, можно сделать вывод о продолжительности непрерывной работы системы от одного комплекта батарей 35-40 часов. Поскольку обычно испытания автомобильных трансмиссий проходят с большими перерывами на изготовление и монтаж новых конструкций, выезд на испытательный полигон и т.д., а собственно измерительный процесс длится не более 15-20 минут, то ресурс батарейного питания 35-40 часов можно считать достаточным.

### КОНСТРУКЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА

Конструкция измерительного блока показана на рис. 5. Измерительный блок имеет круглое металлическое основание для крепления к ступице полуоси автомобиля. На основание установлена электронная плата с отсеком батарейного питания. На оси вращения блока установлен адаптер Bluetooth, прикрываемый защитным стеклотекстолитовым колпаком, пронизываемым для радиоволн.

### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ РЕГИСТРАТОРА ДАННЫХ И ДАТЧИКИ

Основным элементом регистратора данных является модуль CPU686E. Согласно документации модуль имеет процессор с тактовой частотой 300 МГц, ОЗУ 32/128 Мбайт, возможность подключения твердотельных дисков CompactFlash, контроллеры USB и Ethernet. В программном отно-

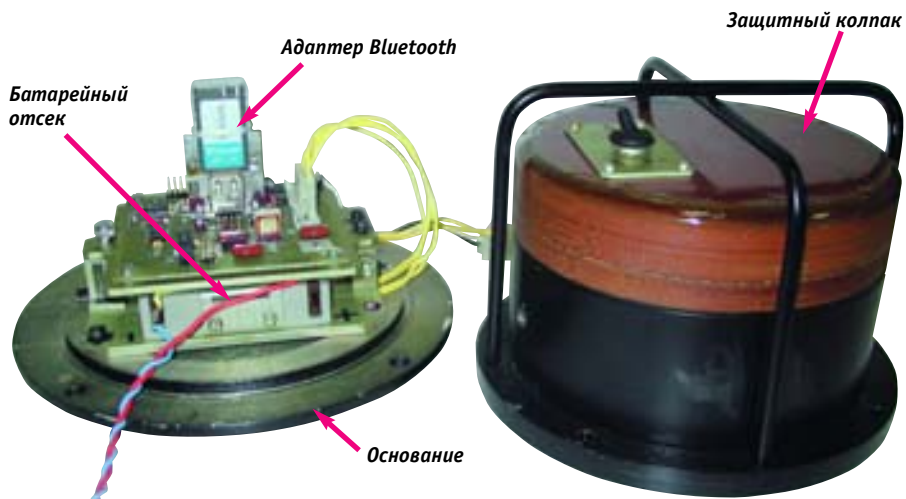


Рис. 5. Конструкция измерительного блока

шении CPU686E совместим с DOS и Windows, причём версия DOS 6.22 встроена в поставляемый модуль.

В нашей телеметрической системе предусмотрено подключение выносного адаптера Bluetooth DBT-120 к CPU686E через интерфейс USB 1.0. Фактически оказалось, что встроенная в CPU686E версия DOS не содержит драйвера USB, поэтому мы были вынуждены использовать операционную систему Windows 98, которая устанавливается на CompactFlash, занимая здесь часть места, предназначенного для накопления экспериментальных данных.

Другим функциональным элементом регистратора данных является модуль дискретного ввода с гальванической развязкой DI32, к которому предусмотрено подключение датчиков Д7 и Д8.

Датчик Д7 предназначен для измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя автомобиля. Первичный сигнал этого датчика представляет собой синусоидальное напряжение, получаемое с одной из фаз трёхфазного генератора, из которого после выпрямителя образуется бортовое напряжение 24 В. Амплитуда синусоиды изменяется в диапазоне от 10 до 40 В, частота — от 30 до 100 Гц.

В блоке регистратора данных отрицательная полуволна этого синусоидального напряжения обрезается, а положительная полуволна ограничивается стабилитроном на уровне 4,7 В. Трапецеидальные импульсы, полученные таким образом из синусоиды, вводятся в модуль DI32 с целью измерения их частоты.

В качестве датчика Д8 используется электронный спидометр. Частота импульсов Д8, определяющая скорость движения автомобиля, изменяется в пределах от 5 до 100 Гц, низкий уровень сигнала находится в пределах от 0 до 1,9 В, а высокий уровень равен +8 В. Схема ввода этих импульсов в модуль DI32 аналогична схеме для датчика Д7.

Для измерения частот импульсов датчиков Д7 и Д8 используется измеритель частоты, встроенный в модуль DI32. Измеритель имеет аппаратный 16-разрядный счётчик (регистр данных), который в течение времени из-



Рис. 6. Регистратор данных, ноутбук и блок питания (этап лабораторной наладки)

мерений заполняется импульсами собственного тактового генератора. Измерения частоты входных импульсов можно производить в течение одного или (для повышения точности) в течение нескольких периодов этих импульсов. Запуск измерителя частоты производится программно от CPU686E путём задания номера канала ввода входных импульсов. В момент окончания процесса измерений измеритель частоты вырабатывает аппаратное прерывание CPU686E, свидетельствующее о готовности результата в регистре данных.

Внешний вид регистратора данных показан на рис. 6.

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕГИСТРАТОРА ДАННЫХ

Программное обеспечение регистратора данных (CPU686E) реализует следующие основные функции:

- последовательное формирование запросов в 6 измерительных блоках, передача их через USB и адаптеры Bluetooth DBT-120 (период запросов в каждый блок задан равным 90 мс);
- приём от измерительных блоков через адаптеры Bluetooth и USB ответных пакетов с накопленными тензометрическими данными;
- измерение периодов импульсных сигналов от датчиков Д7 и Д8;
- запись на CompactFlash пакетов с тензометрическими данными и периодов импульсов датчиков Д7 и Д8 с указанием текущего времени.

Как уже было сказано, в связи с отсутствием в DOS драйвера USB мы были вынуждены использовать операционную систему Windows 98. Но при измерении частот импульсных датчиков Д7 и Д8 возникла проблема обработки аппаратных прерываний CPU686E от

модуля DI32. В операционной системе Windows, разработанной для решения офисных задач, не предусмотрены прерывания от внешней аппаратуры, необходимые в системах реального времени. Эта причина привела нас к необходимости разработки программы для измерения периодов импульсных сигналов с помощью DI32 под управлением DOS.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ

В результате работы описываемой системы при испытаниях трансмиссии в общем файле на диске CompactFlash оказываются записанными функции крутящих моментов на полуосях автомобиля, полученные на основе данных измерительных блоков, переданных в регистратор по радиоканалам, а также вспомогательные данные о режиме работы двигателя и скорости движения автомобиля, полученные с помощью датчиков Д7 и Д8.

После окончания испытаний (при остановленном автомобиле) экспериментальные данные с CompactFlash по каналу Ethernet вводятся в ноутбук Panasonic CF W2. В ноутбуке производится разделение общего файла данных на файлы, соответствующие отдельным каналам, поканальное масштабирование и визуальный просмотр полученных функций в графической форме. После этого файлы данных вводятся в пакет Catman, имеющий богатый сервис для дальнейшего анализа и документирования результатов испытаний.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На описанную систему получен патент Республики Беларусь № 1743 «Телеметрическая система для испытаний транспортных средств».

Система используется на Минском автомобильном заводе.

Ранее при дорожных испытаниях трансмиссий сигналы тензодатчиков, установленных на вращающихся полуосях, снимались с помощью скользящих контактов и передавались в кабину автомобиля по многочисленным проводам. Основное преимущество представленной системы — в беспроводной передаче данных и существенном повышении помехоустойчивости измерительных трактов. ●