

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.17/681.518.5

Универсальная информационно-измерительная система ГДС-16 для проведения прочностных и термомеханических испытаний материалов и элементов конструкций

А. В. Дроздов¹, Л. В. Кравчук

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

¹ drozdov@ipp.kiev.ua

Описана универсальная информационно-измерительная система ГДС-16, созданная на базе измерительных усилителей QuantumX MX840 и программного обеспечения Catman Easy. Система обеспечивает многоканальное измерение деформации, перемещения, давления и температуры, их обработку, представление и накопление экспериментальных данных, что позволяет проводить испытания на прочность, а также термомеханические испытания материалов и элементов конструкций.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, деформация, температура, тензорезистор.

Введение. В настоящее время достаточно стандартизировано и регламентировано проведение механических испытаний различных конструкционных материалов при простом растяжении, сжатии, изгибе, кручении и других видах нагружения. Для этого приняты соответствующие нормативные документы, разработаны и широко применяются соответствующие испытательные машины. Испытания проводят с использованием образцов стандартной формы, при этом измеряют и регистрируют несколько параметров, например усилие, деформацию или перемещение, температуру. Однако при необходимости проведения более сложных испытаний на прочность, а также термомеханических испытаний элементов конструкций и габаритных изделий, таких как, например, модели теплозащитных конструкций ракетно-космических систем, оболочки из композиционных неметаллических материалов [1], напряженно-деформированное состояние и поля температур в таких объектах следует оценивать посредством многоканального измерения различных механических величин с последующим накоплением и сохранением обширного массива экспериментальных данных. Для решения этой задачи требуются специальные многоканальные информационно-измерительные системы. Целью настоящей работы является разработка многоканальной информационно-измерительной системы для проведения испытаний на прочность, а также термомеханических испытаний материалов и элементов конструкций, которая удовлетворяла бы таким требованиям, как универсальность, высокое быстродействие, мобильность, наличие программного обеспечения для осуществления измерения, представления и сохранения экспериментальных данных.

Аппаратурная часть системы. Одной из лидирующих в области создания измерительных систем и проведения комплексных испытаний объектов аэрокосмической техники [2, 3], автомобильной промышленности, строительных конструкций является компания НВМ (Германия). Для разработки информационно-измерительной

системы ГДС-16 использовалась продукция этой компании с учетом широкой номенклатуры выпускаемой измерительной техники, ее хороших метрологических характеристик, наличия соответствующего программного обеспечения.

Внешний вид универсальной 16-канальной информационно-измерительной системы ГДС-16, предназначенной для проведения испытаний на прочность и термо-механических испытаний материалов и элементов конструкций, показан на рис. 1. В качестве основного измерительного блока системы выбран универсальный усилитель QuantumX MX840 (далее – усилитель MX840), производимый компанией НВМ [4] (рис. 2).



Рис. 1. Внешний вид информационно-измерительной системы ГДС-16.



Рис. 2. Внешний вид универсального измерительного усилителя MX840.

Усилитель имеет ряд преимуществ по сравнению с другими подобными измерительными приборами. Он является универсальным, так как к нему можно подключать различные датчики и преобразователи механических и электрических величин при обеспечении их питания от внутренних источников постоянного или переменного напряжения. Усилитель позволяет проводить параллельное измерение и предварительную обработку сигналов сразу по восьми независимым измерительным каналам. Наличие в каждом из каналов аналого-цифрового преобразователя существенно повышает быстродействие информационно-измерительной системы по сравнению с известными инструментальными платами и блоками.

Класс точности универсального усилителя MX840 составляет 0,05, с его помощью можно проводить измерения с частотой до 19,2 кГц/канал при 24-битном аналого-цифровом преобразовании в каждом измерительном канале. Кроме того, в

усилителе имеются фильтры Bessel, Butterworth с частотой от 0,01 Гц до 3,2 кГц, которые могут настраиваться индивидуально для каждого канала. Очень важно, что все входы усилителя электрически изолированы, что повышает его помехозащищенность и надежность. Его подключение к компьютеру осуществляется по интерфейсу Ethernet TCP/IP. Характерной особенностью усилителя MX840 и других измерительных систем компании НВМ является поддержка технологии TEDS (transducer electronic data sheets), т.е. возможность считывания и воспроизведения параметров измерительных преобразователей, которые содержатся в их внутренней EEPROM памяти [5].

Блок-схема универсальной информационно-измерительной системы ГДС-16 показана на рис. 3. Два универсальных усилителя MX840 соединены между собой с помощью интерфейса Firewire (IEEE 1394), что обеспечивает их синхронную работу и питание. Обмен данными между этими усилителями и персональным компьютером осуществляется по интерфейсу Ethernet TCP/IP при использовании коммутатора 10/100 Fast Ethernet Switch D-Link. В системе имеется 16 измерительных каналов: восемь каналов используются для измерения температур при подключении к ним термопар типа К, J, S, T, R, E, N, В, шесть – для измерения деформаций или перемещений с помощью тензорезисторных датчиков (full bridge strain gauge), соединенных по мостовой схеме, и два – для измерения давления или нагрузки как параметров нагружения при испытании различных объектов.

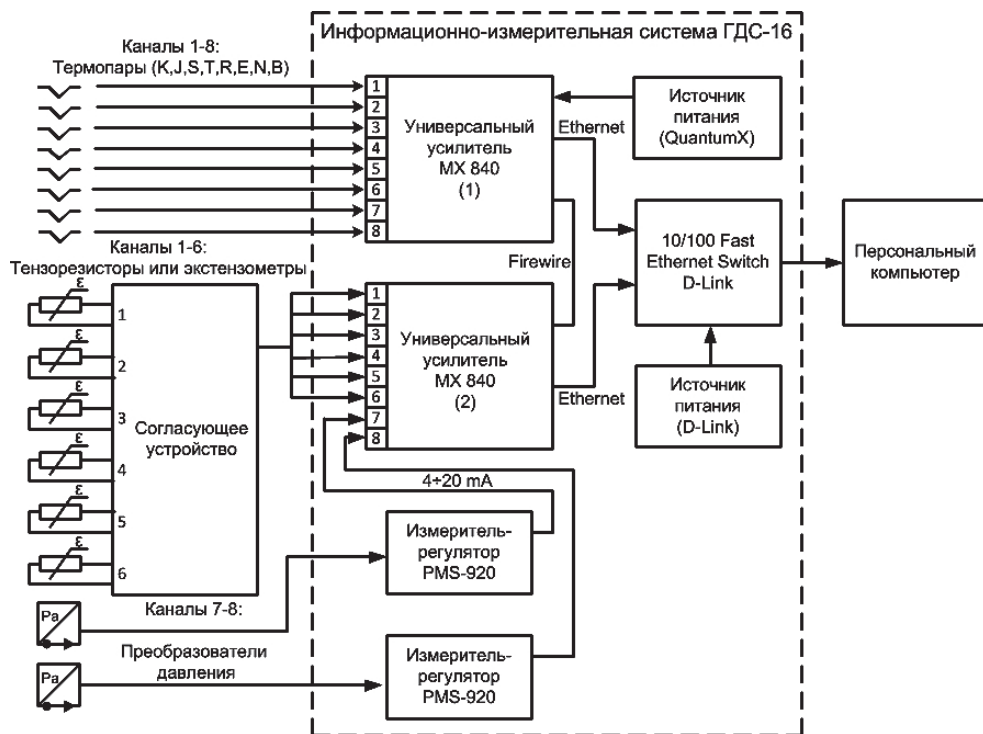


Рис. 3. Блок-схема информационно-измерительной системы ГДС-16.

В случае измерения деформаций на поверхности объектов испытаний использовали одиночные тензорезисторы типа КФ5П1. Поскольку усилители MX840 могут работать с тензодатчиками, соединенными по мостовой схеме, для подключения одиночных тензорезисторов к системе ГДС-16 было разработано специальное согласующее устройство, содержащее прецизионные резисторы, которые являются пассивными плечами моста в каждом из каналов измерения деформации. При измерении

перемещений использовали экстензометры, основным элементом которых были упругие скобы с наклеенными на них тензорезисторами, соединенными по мостовой схеме.

Для измерения и индикации величины давления или нагрузки в систему ГДС-16 включены два измерителя-регулятора PMS-920 фирмы APLISENS (Польша). В качестве датчиков давления, которые подключаются к этим регуляторам, использовались преобразователи давления SEN-8601 фирмы KOBOLD (Германия) и PC-28 фирмы APLISENS (Польша) с выходным токовым сигналом в диапазоне 4...20 мА.

Информационно-измерительная система ГДС-16 является универсальной, при необходимости к ней могут быть подключены также преобразователи тока и напряжения, индуктивные преобразователи, датчики перемещения (LVDT), датчики сопротивления, потенциометры, различные частотные и импульсные датчики. Универсальные усилители MX840, входящие в систему ГДС-16, обеспечивают питание всех перечисленных измерительных преобразователей внутренними источниками постоянного или переменного напряжения.

Программное обеспечение системы. Преимуществом применения измерительных устройств компании НВМ, в том числе универсальных усилителей MX840, является наличие специального коммерческого программного обеспечения Catman Easy [6], которое благодаря характерным особенностям позволяет упростить и облегчить как процесс подготовки и проведения измерений, так и обработку и представление экспериментальных данных. Отметим, что в программном обеспечении имеется база (sensor database), где хранятся параметры широкой номенклатуры датчиков и измерительных преобразователей различных физических величин, в том числе тензорезисторных мостов, термоэлектрических преобразователей, индуктивных датчиков, преобразователей с нормированным выходным током и напряжением и т.д. В результате конфигурирования и настройки измерительного канала усилителя MX840 под конкретный датчик обеспечивается питание последнего (возбуждение) от встроенного источника переменного или постоянного напряжения, обнуление начального разбаланса, необходимое преобразование выходного сигнала датчика в конкретную физическую величину (усилие, давление, деформация, перемещение, температура). Подключенные измерительные датчики отображаются в списке каналов в программе Catman Easy (рис. 4). С учетом реализованной структуры системы ГДС-16 в данный список внесены восемь каналов измерения температуры с помощью термоэлектрических преобразователей типа К, шесть каналов измерения сигналов тензорезисторных преобразователей (SG fullbridge sensors), соединенных по мостовой схеме, и два канала измерения давления с использованием преобразователей PC-28, имеющих токовый выходной сигнал в диапазоне 4...20 мА.

С помощью универсального усилителя MX840 и программного обеспечения Catman Easy можно непосредственно измерять приращение сопротивления одного активного плеча в мостовой схеме. В общем случае зависимость выходного напряжения моста V_{out} от приращения сопротивления одного активного плеча ΔR при равных значениях начального сопротивления в каждом из четырех плеч R_0 является нелинейной функцией:

$$V_{out} = \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{(2R_0 + \Delta R)} V_{exc}, \quad (1)$$

где V_{exc} – напряжение питания моста.

Зачастую принимают, что $\Delta R \ll R_0$, и тогда выражение (1) преобразуется в линейную зависимость:

$$V_{out} = \frac{1}{4} \frac{\Delta R}{R_0} V_{exc}. \quad (2)$$

			Channel name	Slot	Sensor
1	[-]	[Icon]	Device_1 MX840 (192.168.169.10)		
4	[Icon]	[Icon]	Thermocouple1	1	Thermocouple Type K
5	[Icon]	[Icon]	Thermocouple2	2	Thermocouple Type K
6	[Icon]	[Icon]	Thermocouple3	3	Thermocouple Type K
7	[Icon]	[Icon]	Thermocouple4	4	Thermocouple Type K
8	[Icon]	[Icon]	Thermocouple5	5	Thermocouple Type K
9	[Icon]	[Icon]	Thermocouple6	6	Thermocouple Type K
10	[Icon]	[Icon]	Thermocouple7	7	Thermocouple Type K
11	[Icon]	[Icon]	Thermocouple8	8	Thermocouple Type K
12	[-]	[Icon]	Device_2 MX840 (192.168.169.11)		
15	[Icon]	[Icon]	SG1	1	SG fullbridge sensor
16	[Icon]	[Icon]	SG2	2	SG fullbridge sensor
17	[Icon]	[Icon]	SG3	3	SG fullbridge sensor
18	[Icon]	[Icon]	SG4	4	SG fullbridge sensor
19	[Icon]	[Icon]	SG5	5	SG fullbridge sensor
20	[Icon]	[Icon]	SG6	6	SG fullbridge sensor
21	[Icon]	[Icon]	Pressure 2.5 MPa	7	PC-28 2.5 MPa
22	[Icon]	[Icon]	Pressure 25 MPa	8	PC-28 2.5 MPa
23	[-]	[Icon]	Computation channels		
24	[Icon]	[Icon]	Deformation 1		1000*SG1/(2.1*200)
25	[Icon]	[Icon]	Deformation 2		1000*SG2/(2.1*200)
26	[Icon]	[Icon]	Deformation 3		1000*SG3/(2.1*200)
27	[Icon]	[Icon]	Deformation 4		1000*SG4/(2.1*200)
28	[Icon]	[Icon]	Deformation 5		1000*SG5/(2.1*200)
29	[Icon]	[Icon]	Deformation 6		1000*SG6/(2.1*200)
30					

Рис. 4. Каналы системы ГДС-16 в проекте программы Catman Easy.

Относительная погрешность измерения приращения сопротивления при использовании зависимости (2) может достигать 0,3...0,5% и более при максимальных допустимых значениях ΔR . С помощью программного обеспечения Catman Easy была реализована заложенная в нем возможность задания зависимости выходного напряжения моста от приращения сопротивления одного активного плеча в виде таблицы, значения в которой рассчитывали по формуле (1), что позволило уменьшить погрешность и достичь класса точности 0,05 [4].

Еще одно преимущество программного обеспечения Catman Easy – создание по желанию пользователя так называемых вычислительных каналов, в которых можно осуществлять различные математические операции с уже имеющимися измеренными величинами в измерительных каналах, находить экстремальные значения, осуществлять цифровую фильтрацию сигналов, выполнять статистическую обработку и т.д. Для преобразования результатов измерений приращения сопротивления тензорезистора в деформацию поверхности испытываемого объекта создано шесть соответствующих вычислительных каналов. Деформацию ε в каждом канале определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{SR_0}, \tag{3}$$

где S – коэффициент тензочувствительности используемых тензорезисторов.

Программное обеспечение Catman Easy включает в себя также набор специальных средств и инструментов для визуального представления величин, измеряемых по каналам в режиме реального времени. Это панель цифровых индикаторов, панель графиков изменения измеряемых величин во времени, панель осциллографа. На рис. 5 показан вариант созданной применительно к системе ГДС-16 панели цифровых

Temperature Channels (1..8):			
Thermocouple1 14,9 °C	Thermocouple2 15,3 °C	Thermocouple3 33,3 °C	Thermocouple4 33,0 °C
Thermocouple5 33,7 °C	Thermocouple6 31,5 °C	Thermocouple7 32,4 °C	Thermocouple8 32,2 °C
Strain Gage Channels (1..6):			Pressure Channels:
SG1 -0,00050 ohm	SG2 0,00027 ohm	SG3 -0,00006 ohm	Pressure 2.5 MPa -0,624 MPa
SG4 -0,00024 ohm	SG5 0,00015 ohm	SG6 0,00015 ohm	Pressure 25 MPa -6,252 MPa

Рис. 5. Панель цифровых индикаторов в проекте программы Catman Easy.

индикаторов, измеряемых в режиме реального времени значений температур, приращения сопротивлений тензорезисторов и давления.

Пример практического использования системы ГДС-16. С помощью разработанной системы ГДС-16 успешно проведены исследования напряженно-деформированного состояния и кинетики разрушения элементов труб, нагружаемых внутренним давлением [7]. Регистрировали диаграммы давление – перемещение берегов паза, созданного на внешней поверхности отрезков труб. При этом использовали стандартные датчики давления с выходным токовым сигналом, а также специально изготовленные упругие скобы для измерения малых перемещений с наклеенными на них тензорезисторами, соединенными по мостовой схеме. Проведенные испытания подтвердили универсальность и высокие метрологические характеристики информационно-измерительной системы ГДС-16.

Заключение. Создана универсальная 16-канальная информационно-измерительная система ГДС-16, предназначенная для параллельного измерения деформации, перемещения, давления и температуры. Использование усилителей МХ840 и программного обеспечения Catman Easy компании НВМ обеспечило универсальность, высокую точность и быстродействие измерений и обработки сигналов, а также графическое представление измеряемых величин в режиме реального времени. Благодаря хорошим техническим характеристикам информационно-измерительная система ГДС-16 может успешно использоваться для проведения как статических, так и динамических испытаний на прочность, а также термомеханических испытаний материалов и элементов конструкций.

Резюме

Описано універсальну інформаційно-вимірювальну систему ГДС-16, що базується на використанні підсилювачів QuantumX МХ840 і програмного забезпечення Catman Easy. Система реалізує багатоканальне вимірювання деформації, переміщення, тиску й температури, їх обробку, відображення і накопичення експериментальних даних, що дозволяє проводити випробування на міцність та термомеханічні випробування матеріалів і елементів конструкцій.

1. *Прочность* материалов и конструкций / Под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Академперіодика, 2005. – 1088 с.
2. *Structural and Functional Tests in Aerospace*: <http://www.hbm.com/en/0065/structural-and-functional-tests-in-aerospace/>.

3. *Airbus A380* Large-Scale Test Using HBM Measurement Technology: <http://www.hbm.com/en/0071/a380-full-scale-fatigue-tests/>.
4. *QuantumX MX840B*. The 8-Channel Universal Amplifier of HBM's QuantumX Data Acquisition System: <http://www.hbm.com/en/2129/quantumx-mx840b-8-channel-universal-amplifier/>.
5. *Data Acquisition Handbook*/Measurement Computing Corporation, 10 Commerce Way, Norton, MA 02766, 2004-2012. – 134P: <http://www.mccdaq.com/pdfs/anpdf/Data-Acquisition-Handbook.pdf/>.
6. *Data Acquisition & Analysis Software*. Catman Software Simplifies the Acquisition Visualization and Analysis of Your Measurement Data: <http://www.hbm.com/en/2290/catman-data-acquisition-software/>.
7. Кравчук Л. В., Барыло В. Г., Буйских К. П. Расчетно-экспериментальная оценка работоспособности элементов труб в эксплуатационных условиях // Пробл. прочности. – 2013. – № 4. – С. 112–118.

Поступила 20. 04. 2016