

# **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ СТАТИЧЕСКИХ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Игорь Г. Гурьев, Анатолий В. Александров \*,  
Лев С. Заславский, Владислав Г. Суринт, Александр А. Фридлянд \*\*

\* ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, г. Санкт-Петербург, Россия

\*\* НПП «ПАРК-Центр»

## **АННОТАЦИЯ**

*Описана автоматизированная система СИТ 3001 сбора, регистрации и обработки результатов тензометрических измерений, выполняемых при проведении статических прочностных испытаний.*

*Система создана в 2001 году и состоит из тензостанции УИТ, персонального компьютера и пакета прикладных программ «Тензометрия 2.0».*

*Тензостанция УИТ и системное и метрологическое обеспечение к ней разработаны в НПП «ПАРК-Центр». Поставленный комплект тензостанции рассчитан на подключение 240 каналов измерений (тензорезисторы и тензодинамометры). Цикл однократного опроса всех каналов порядка 1 секунды. Связь тензостанции с ПК осуществляется через стандартный последовательный порт и не требует установки в компьютер дополнительного оборудования.*

*Пакет прикладных программ обобщает более чем тридцатилетний опыт ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова в области автоматизации тензометрических измерений и обеспечивает обработку показаний тензорезисторов, оценку погрешности измерений, расчет напряжений для изотропных и анизотропных материалов, учет пластичности материала, представление результатов обработки в табличной и графической формах.*

1. Рост стоимости экспериментальных исследований, опережающий рост затрат на науку в целом, поставил вопрос об удешевлении испытаний сложных конструкций за счет сокращения общего числа испытаний с повышением информативности каждого из них. Поэтому современный прочностной эксперимент немислим без автоматизации сбора и обработки тензоизмерений, выполняемых при проведении таких испытаний.

Работы в этом направлении ведутся в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова более 25 лет и за эти годы последовательно были созданы и использовались в практике испытаний несколько поколений измерительных комплексов, смена которых обуславливалась появлением новых типов ЭВМ и тензостанций, повышением требований к качеству измерений и форме представления результатов, совершенствованием алгоритмов обработки данных. Замена технической базы комплекса, к сожалению, каждый раз требовала практически полной переработки программного обеспечения, что заставило, в конце концов, заняться проблемой создания такого пакета программ, который был бы в максимальной степени независим от характеристик технических средств.

1.1 До настоящего времени в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова в практике статических прочностных испытаний использовалась автоматизированная тензометрическая система, разработанная более десяти лет назад.

Аппаратную основу комплекса составляли серийно выпускавшаяся отечественной промышленностью в 80-е годы информационная измерительная система К742/1 и IBM-совместимый персональный компьютер класса 286, а программную - пакет прикладных программ «Тензометрия 1.0» [ 1 ].

В связи с износом технических средств и несоответствием их современным требованиям, предъявляемым к точности и надежности получаемых результатов, дизайну представляемых данных и интерфейсу программного обеспечения с пользователем, специалистами ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова и Научно-производственного предприятия «ПАРК-Центр» разработана тензометрическая автоматизированная система нового поколения СИТ 3001.

Концепция построения новой системы особых изменений не претерпела, поскольку методология выполнения тензоизмерений и обработки результатов, отработанная за многие годы проведения статических прочностных испытаний, достаточно стабильна и, следовательно,

не меняются требования к функциональному назначению тензометрических систем. В частности, в системе СИТ 3001 не предусмотрено управление процессом нагружения конструкции, контроль ее состояния неразрушающими методами (например, акустической эмиссии) и т.д., традиционно выполняемые отдельными автоматизированными системами.

Аппаратная часть системы, тензостанция, - устройство измерительное тензометрическое (УИТ), - является многоканальным магистрально-модульным измерительным средством, реализующим архитектуру программно-управляемых перестраиваемых измерительных цепей, позволяющих гибко адаптировать структуру измерительных каналов к типу подключаемых на их входы первичных преобразователей (датчиков). Использование данного принципа построения аппаратуры [ 2 ] позволяет обеспечивать широкие функциональные возможности аппаратуры при высоком уровне метрологических характеристик измерительных каналов и низких значениях энергопотребления и весогабаритных характеристик.

Преобразование электрических информативных параметров датчиков, подключенных к входам измерительных каналов УИТ, в цифровую форму осуществляется путем последовательной коммутации выходных полюсов датчиков к программно-управляемым измерительным цепям, осуществляющим аналого-цифровое преобразование, результаты которого обрабатываются микропроцессорными вычислительными устройствами для получения результатов измерений в виде измеряемых физических величин или функционалов от ряда измеряемых параметров. Аналого-цифровое преобразование осуществляется с использованием алгоритмов дельта-сигма модуляции, обеспечивающих высокий уровень точности и помехозащищенности, что особенно важно при работе аппаратуры с удаленными датчиками с протяженными линиями связи.

УИТ имеет следующие основные технические характеристики:

- число измерительных каналов – до 300 шт. (в комплекте, поставленном в ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова – 240 шт.);

любой измерительный канал может работать с тензорезисторами, включаемыми как по схеме полумоста (“1/2М”) с общим компенсационным тензорезистором (ОКТ), так и тензорезисторами, включенными по схеме полного моста (“1/1М”), например, тензорезисторными датчиками силы, а также с термопреобразователями сопротивления типов ТСП, ТСМ и термоэлектрическими преобразователями типов ТХК, ТХА;

номинальные значения сопротивления тензорезисторов: для “1/2М” – 100, 120, 200 Ом, для “1/1М” – 400 Ом;

типономиналы термопреобразователей сопротивления: ТСП 100, ТСП 500, ТСМ 50, ТСМ 100 (также возможны реализации других градуировочных характеристик);

цикл опроса всех измерительных каналов УИТ – не более 1 с;

предел допускаемого значения основной абсолютной погрешности определения относительного изменения сопротивления тензорезисторов, включенных по схеме “1/2М” с ОКТ в диапазоне от 0 до 80000 ррм (мкОм/Ом) составляет не более 100 ррм, а для тензорезисторов, включенных по схеме “1/1М” в диапазоне от -1000 до 1000 ррм – не более 3 ррм;

предел допускаемого значения основной абсолютной погрешности измерения температуры при работе с термоэлектрическими преобразователями и термопреобразователями сопротивления в диапазоне температуры от 0 до 400 °С – не более 0,1 °С;

УИТ обеспечивает связь с персональным компьютером по интерфейсу RS232C со скоростями обмена 9600, 38400, 57600, 115200 бод;

мощность, потребляемая УИТ от сети переменного тока 220 В, 50 Гц, не превышает 50 ВА;

масса УИТ не превышает 15 кг.

УИТ выполнено в 19-дюймовых евроконструкциях и может быть использовано как в виде настольного прибора, так и в стандартной 19-дюймовой стойке.

Наличие в составе УИТ микропроцессора позволяет передать ему часть функций обработки данных. Однако, поскольку перепрограммирование микропроцессора достаточно сложная задача, при разработке программного обеспечения системы СИТ 3001 было решено использовать возможности микропроцессора в минимально необходимом объеме, - измерение,

преобразование выходного сигнала датчика в цифровой код и формирование буфера передачи данных, - оставив всю остальную обработку, начиная с преобразования кода в физическую величину и усреднения данных, за центральным процессором системы.

1.2 Измерительная информация, получаемая в процессе проведения статического прочностного эксперимента судовых корпусных конструкций, характеризуется:

- большим числом входных и выходных параметров (многомерность задачи);
  - взаимной зависимостью измеряемых параметров;
  - низкой степенью упорядоченности входного потока измерительной информации;
  - малым временем, предоставляемым экспериментатору для измерения и оценки полученных данных на каждой ступени измерения;
  - наличием неконтролируемых возмущений (погрешности измерений, ошибки документации, особенности поведения конструкции при испытаниях);
- необходимостью оценки достоверности предоставляемой экспериментатору информации.

Особенности входного потока измерительной информации и принципов ее обработки обуславливают требования к программному обеспечению автоматизированных комплексов, применяемых при прочностных испытаниях. Разработанное программное обеспечение имеет модульную структуру и основывается на языках высокого уровня FORTRAN=90 и C++.

Используемый в настоящее время пакет прикладных программ (ППП) "Тензометрия" разработан для персональных компьютеров, программно совместимых с IBM PC, и представляет собой набор автономных модулей, объединенных программой-диспетчером и общими файлами данных. Такая древовидная структура пакета обеспечивает полное разделение функций между модулями, что удобно для редактирования и замены отдельных модулей, а также предоставляет пользователям возможность пополнения пакета собственными разработками.

Относительная независимость пакета от характеристик тензостанции достигается наличием в нем специальной программы конфигурации, с помощью которой эти характеристики вводятся в ЭВМ и определяют порядок опроса тензорезисторов и длины записей в файлах данных, а также использованием динамического распределения оперативной памяти, что позволяет варьировать длины рабочих массивов. Для приспособления ППП к новому типу тензостанции поэтому необходима замена всего одного модуля, который содержит драйвер управления ее работой.

1.3 ППП является многопоточным Windows-приложением. Архитектура пакета создана на основе объектно-ориентированного проектирования программ. Параллельная обработка нескольких потоков информации позволяет проводить в реальном масштабе времени опрос СИТ, просмотр показаний датчиков и запись измерительной информации на жесткий диск. Применение технологии OLE (Object Linking and Embedding) обеспечивает бесшовную интеграцию модулей подготовки данных и получения результатов измерений с офисным приложением Excel. Такая интеграция полностью решает проблему автоматической подготовки протоколов испытаний, создания электронных и печатных копий отчетной документации.

Автоматизация управления процессом погружения конструкции в данном пакете не предусмотрена.

2. ППП "Тензометрия" состоит из четырех программных комплексов:

- описание измерительной схемы;
- измерение и экспресс-обработка данных в темпе проведения эксперимента;
- полная обработка данных;
- представление результатов.

Компьютерная обработка результатов измерений возможна лишь в случае, если измерительная схема (объединение тензорезисторов в структуры, описание этих структур и порядка их подключения к тензостанции) организована по определенным правилам. Чем меньше возможных типов структур предусмотрено в схеме и чем более жестки правила их описания - тем меньше объем исходных данных, вводимых в компьютер, но тем меньше

возможности программного комплекса системы, тем сложнее обеспечить оптимальное подключение тензорезисторов и устранить ошибки, допущенные при составлении схемы.

В ППП "Тензометрия" установлены следующие структурные единицы организации измерительной схемы:

- тензорезистор (ТР);
- разъем;
- розетка;
- сечение;
- группа ТР или розеток.

Система нумерации тензорезисторов должна обеспечить идентификацию их на объекте испытаний (объектный номер), соответствие тензорезистора определенному проводу (монтажный номер) и определить порядок опроса ТР компьютером (машинный номер). Если на систему нумерации ТР не наложено никаких ограничений, плохая упорядоченность входного потока данных вызовет необходимость постоянного перебора больших массивов информации, что значительно снизит быстродействие программного комплекса. Более того, низкая степень упорядоченности нумерации ТР повышает вероятность появления ошибок в исходных данных.

В ППП "Тензометрия" номер ТР записывается десятичным числом вида  $nnnn.mmm$ , в котором целая часть идентифицирует номер разъема, а дробная порядковый номер провода внутри разъема, к которому подключен данный ТР, т.е. объектный и монтажный номера ТР совпадают.

Для возможности подключения разъемов к тензостанции в произвольном порядке в пакете формируется специальная "таблица номеров подключенных разъемов", которая обеспечивает идентификацию объектного номера ТР по его машинному номеру. Опрос ТР выполняется последовательно по машинным номерам, а далее результаты переписываются зонами (разъемами) в файл прямого доступа, упорядоченный в порядке возрастания объектных номеров разъемов. Все ТР, подключенные к одному разъему, должны иметь одинаковые метрологические характеристики, но для различных разъемов эти характеристики могут быть разными.

Розетка - это один или несколько (до 12) тензорезисторов, показания которых обрабатываются совместно для определения всех интересующих экспериментатора компонент тензора напряжений в заданной точке конструкции. В ППП "Тензометрия" возможна обработка 16 типов розеток - одно- и двухосных, прямоугольных, дельта-розеток, одно- и двухсторонних, с дублированием ТР и без оного. Число ТР в розетке определяется априорными сведениями о характере напряженного состояния данного элемента конструкции и желанием экспериментатора повысить точность и достоверность результатов путем установки избыточных ТР.

Нумерация ТР внутри розетки - жесткая, т.е. число ТР в розетке и порядок подключения их к тензостанции полностью определяются типом розетки и номером первого ее тензорезистора. Двухсторонняя розетка определяется типом и двумя номерами ТР, начальных для каждой из сторон конструкции.

При пересчете показаний ТР в напряжения для каждой розетки можно ввести свои параметры упругости материала.

Розетка и разъем - обязательные структуры измерительной схемы, т.е. каждый ТР подключен к какому-то разъему и входит в какую-то розетку, причем только в одну.

Сечение - совокупность розеток, установленных вдоль некоторого характерного направления конструкции (например, вдоль шпангоута) с целью построения эпюр распределения деформаций (напряжений) по этому направлению. Расположение розеток в сечении - произвольное или с равномерным шагом, в сечении могут быть включены розетки разных типов, одна и та же розетка может входить в несколько сечений (или не входить никуда).

Сечение - не обязательная структура, т.е. сечения формируются экспериментатором при наличии в этом необходимости.

Еще одна не обязательная структура - группа ТР или розеток, выделяемая экспериментатором по некоторому признаку для получения, например, статистических характеристик показаний.

Описания каждой структуры хранятся в отдельных файлах (таблицах), заполнение которых осуществляется отдельными программными модулями. В состав комплекса описания схемы в настоящее время входят 8 модулей ввода исходных данных, а также модуль метрологического обеспечения тензостанции, предназначенный для ее поверок и калибровок, и модуль комплексной проверки исходных данных на предмет обнаружения в них ошибок и несоответствий.

3. Комплекс программ измерений состоит из модулей опроса ТР на начальной (балансировочной) и текущей ступенях нагрузки, регистрации песправных ТР с указанием причины неисправности и экспресс-обработки данных.

Наряду с основной функцией регистрации результатов измерений эти программы содержат методы предварительной оценки достоверности наблюдений и сжатия экспериментальной информации с целью выявления наиболее существенных и опасных для состояния конструкции изменений в получаемых огромных массивах данных.

Для повышения точности измерений предусмотрена возможность многократного опроса тензорезисторов на каждой ступени измерений. Результатом наблюдений считается медиана выборки, как оценка, наиболее устойчивая к возможным промахам. Показания тензорезисторов с большим (на данной ступени) медианным отклонением бракуются.

После окончания измерений на текущей ступени выполняется экспресс-обработка показаний некоторой группы розеток, установленных в интересующих экспериментатора точках конструкции. Для уменьшения объема анализируемой оператором информации по показаниям ТР контрольных розеток вычисляется интегральная характеристика тензора напряжений - интенсивность напряжений в долях предела текучести материала.

4. Окончательная обработка данных выполняется после окончания эксперимента (или даже в процессе нагружения конструкции на очередную ступень, если для этого есть необходимость, время и достаточный объем накопленной информации, не менее 5-6 ступеней нагрузки).

Обработку рекомендуется начинать с построения гистограммы показаний ТР на одной из ступеней нагружения. Ось абсцисс соответствует уровням измеренных деформаций, а ось ординат - количеству ТР, достигших данного уровня. В результате получается ступенчатая кривая, характеризующая распределение деформаций в исследуемой конструкции. Гистограмму по уровням деформаций можно разделить на зоны малых, умеренных и опасных показаний ТР и в дальнейшем, во-первых, обрабатывать ТР, оказавшиеся в разных зонах, по разным алгоритмам, и, во-вторых, сосредоточить внимание экспериментатора на ограниченном числе точек измерения, находящихся в зоне высоких уровней.

Далее методикой обработки принято проводить сглаживание (аппроксимацию) зависимостей нагрузка - показания тензорезистора методом наименьших квадратов с отбраковкой отдельных выпадающих точек зависимости или всех показаний при неустойчивой работе тензорезистора в целом. Сглаживание производится прямой или прямой и сопряженной с ней параболой второй степени, причем второй алгоритм реализуется, если сглаживание прямой не проходит и максимальное значение деформации в зависимости превосходит некий критический уровень, определяемый при анализе гистограммы. Т.е. тензорезисторы из зоны малых деформаций аппроксимируются только прямой, а из зоны, в которой показания ТР сопоставимы с ошибками измерений, и без отбраковки отдельных точек, которая в этом случае бессмысленна.

Критерием оценки качества показаний служит отношение фактического среднеквадратичного отклонения аппроксимации к средней для данного ТР погрешности единичного измерения, рассчитанной априори по методике Росстандарта [1] с использованием метрологических характеристик тензорезисторов, тензостанции и системы нагружения конструкции. Опыт обработки результатов измерений показывает, что регистрация показаний ТР на нескольких ступенях нагрузки с последующей аппроксимацией позволяет уменьшить погрешность в 2-3 раза по сравнению с погрешностью единичного измерения.

5. Далее экспериментатор может получить распечатки показаний всех ТР (или части их) по всем ступеням нагружения.

Эти распечатки представляют собой первичные данные проведенных испытаний и могут быть использованы для дальнейшей нестандартизированной обработки, а также для проверки правильности алгоритмов, реализованных в ППП "Тензометрия", если они (алгоритмы) вызывают сомнения у заказчика.

Показания каждого ТР могут быть также представлены для просмотра в графической форме. В осях "деформация - нагрузка" на графиках даются показания ТР и аппроксимирующие их зависимости.

Поскольку нормирование прочности и расчеты конструкций ведутся в напряжениях, в ППП выполняется пересчет показаний ТР в напряжения для всех (или части) розеток.

Пересчет выполняется по формулам закона Гука для изотропных и анизотропных материалов, в качестве исходных данных могут быть взяты измеренные или аппроксимированные значения деформаций. Для изотропных материалов напряжения могут быть вычислены с учетом пластичности, в основу алгоритма положены соотношения теории малых упруго-пластических деформаций.

Поскольку при расчете розеток общего типа (состоящих из 3-х ТР и устанавливаемых в точках с заранее неизвестными направлениями главных осей тензора деформаций) погрешность определения главных деформаций возрастает в несколько раз по сравнению с погрешностью отдельного ТР, рекомендуется установка розеток из 4-х ТР, что позволяет, во-первых, оценить погрешность по величине невязки первого инварианта тензора деформаций и, во-вторых, уменьшить погрешность путем корректировки показаний ТР, определяя параметры окружности Мора методом наименьших квадратов по показаниям всех ТР [2].

Для сечений возможно построение эпюр деформаций или напряжений. Для построения эпюры показания розеток, входящих в сечение, аппроксимируются полиномами методом наименьших квадратов, причем степень полинома выбирает экспериментатор, просматривая последовательно разные варианты аппроксимации.

Использование автоматизированной обработки данных в практике проведения прочностных испытаний позволило повысить информативность эксперимента, сократить сроки его проведения и анализа результатов, обеспечило объективность и достоверность измерений, а также сравнимость различных испытаний в связи со стандартизацией методологии их проведения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И.Г. Гурьев, Т.С. Новоселова, В.Г. Тимофеев. Автоматизация тензоизмерений при проведении статических прочностных испытаний судовых конструкций.
2. L.S.Zaslavskiy, S.S.Sokolov, A.G.Solovyov. Problems of creation of multifunctional measuring systems with rebuilt structure. Xth. IMECO WORLD CONGRESS 1985, Preprint Vol.1.
3. Методические указания. ГСИ. Методика определения погрешности измерения деформаций проволочными и фольговыми тензорезисторами. МИ 1347-86. Екатеринбург -, Екатеринбургский филиал ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1986.
4. Автоматизация измерений и обработки данных при испытаниях самолета на прочность. М., Машинное строительство, 1991.