

УДК 621.869

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

**А.В. Воропай, доцент, к.т.н., А.А. Дзюбенко, доцент, к.т.н.,
П.А. Егоров, ассистент, ХНАДУ**

***Аннотация.** Предлагается измерительный комплекс для исследования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций. Приводится методика выбора измерительного оборудования с учетом времени нагружения и характерных частот протекания процесса. В качестве примера исследуются деформационные процессы в стержневом и балочном элементах, контактирующих между собой.*

***Ключевые слова:** деформация, упругий элемент, измерительный комплекс, тензорезистор, АЦП*

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ УДАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

**О.В. Воропай, доцент, к.т.н., О.А. Дзюбенко, доцент, к.т.н.,
П.А. Егоров, ассистент, ХНАДУ**

***Анотація.** Пропонується вимірювальний комплекс для дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій. Наводиться методика вибору вимірювального обладнання з урахуванням часу навантаження і характерних частот протікання процесу. Як приклад досліджуються деформаційні процеси в стрижневому і балочному елементах, що контактують між собою.*

***Ключові слова:** деформація, пружний елемент, вимірювальний комплекс, тензорезистор, АЦП*

MEASURING COMPLEX FOR EXPERIMENTAL RESEARCHES OF STRESS- STRAIN STATE ELASTIC STRUCTURAL COMPONENTS AT IMPACT LOADING

**A. Voropay, assistant professor, cand. eng. sc.,
A. Dzyubenko, assistant professor, cand. eng. sc.,
P. Egorov, assistant lecturer, KhNAHU**

***Abstract.** Measuring complex for experimental researches of stress-strain state of elastic structural components is proposed. The selection methodic of measuring equipment with accounting of the loading time and the frequency characteristic is considered. Deformation processes in contact of the elastic rod and the elastic beam are investigated as an example.*

***Keywords:** deformation, elastic element, measuring system, strain gauge, ADC*

Введение

Осуществление множества технологических операций современного машиностроения связано с ударным взаимодействием элемен-

тов. К таким процессам могут быть отнесены штамповка, бурение, черновая обработка твердых материалов и другие. Совершенствование технологических процессов и орудий труда при этом связано с исследованием

напряженно-деформированного состояния взаимодействующих объектов. С определенной степенью точности процессы деформирования могут быть изучены при помощи построения аналитической или конечно-элементной моделей. В то же время эксперимент по-прежнему остается одним из основных критериев оценки адекватности расчетной модели. Во всей полноте ударные процессы до сегодняшнего времени не изучены.

Анализ публикаций

В работе [1] рассмотрено ударное нагружение шарнирно опертой балки, приведены графики, характеризующие деформационный процесс. Здесь же рассмотрены постановки и решения других контактных задач, произведено сопоставление теорий контакта и экспериментальных данных. Определение контактной силы при поперечном ударе по композитным балкам и пластинам на основе экспериментальных данных приведено в [2]. Решение контактной задачи Герца для случая

низкоскоростного удара по слоистым ортотропным пластинам содержится в [3]. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния ударника и подлежащего удару объектов во взаимосвязи представляет существенный интерес.

Обоснование выбора и описание измерительного комплекса

Исследуемая механическая система состоит из шарнирно опертой балки и стержня (рис. 1, а). Шарнирное опирание было смоделировано при помощи опор, имеющих треугольное сечение (рис. 1, б).

Предлагаемый измерительный комплекс (рис. 2) состоит из тензомоста, выполняющего роль чувствительного элемента при измерении деформаций во времени, усилителя сигналов, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и персонального компьютера с соответствующим программным обеспечением.

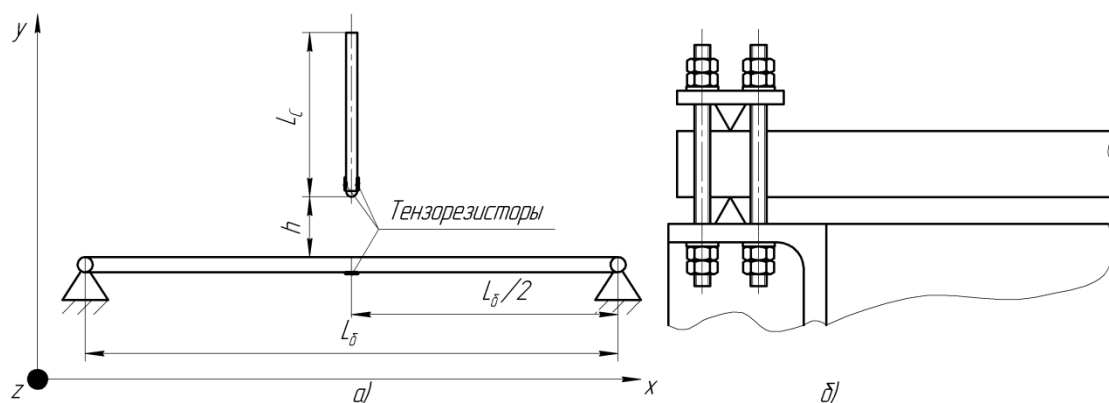


Рис. 1. Схема исследуемой системы

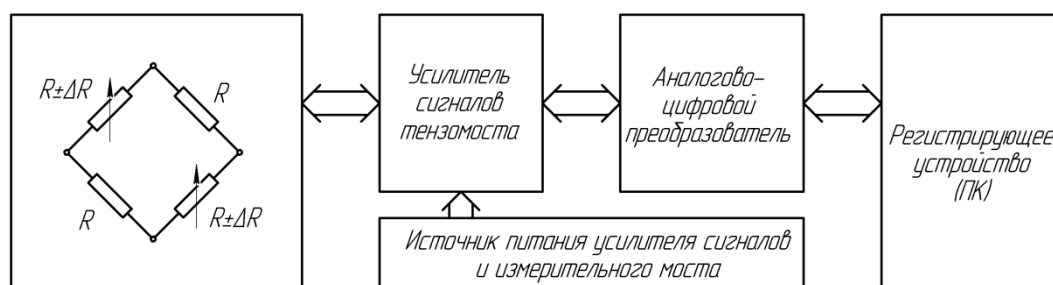


Рис. 2. Схема измерительного комплекса

Для измерения продольных деформаций стержня согласно, приведенной на рисунке 2, электрической схеме два из четырех фольговых тензорезистора измерительного моста были наклеены на диаметрально противополо-

жные стороны вблизи торца стержня. Тензорезисторы, отвечающие за измерение деформаций вдоль оси балки, были наклеены с тыльной по отношению к месту контакта со стержнем стороны. Компенсационные тензо-

резисторы были наклеены на стальные пластины-полосы, деформацию которых можно плавно изменять в некоторых пределах, что позволило компенсировать дисбаланс измерительного тензомоста, вызванный наличием между резисторами соединительных проводов существенной длины и прочими факторами. Согласно рекомендациям для наклейки датчиков был использован клей БФ-2 с последующим горячим отверждением.

Зачастую наибольшее значение в колебательном процессе имеет первая собственная частота колебаний исследуемого элемента. Для шарнирно-опертой балки собственные частоты колебаний можно определить, решая систему дифференциальных уравнений, соответствующих модели балки типа Тимошенко следующего вида:

$$\begin{cases} \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - k' \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) FG = P(x; t); \\ EI \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k' \left(\frac{\partial w}{\partial x} - \psi \right) FG - \rho I \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Описание величин, входящих в (1), приведено в [4].

Для построения решения упомянутых уравнений при нулевых начальных и граничных условиях, соответствующих шарнирному опиранию, используем разложение функций $w(t)$ и $\psi(t)$ в ряды Фурье. Решая полученные уравнения относительно неизвестных $w(t)$ и $\psi(t)$ с использованием операционного исчисления, получим решение вида:

$$\begin{aligned} w(x, t) &= \frac{1}{\rho F} \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^t C_k \cdot P(\tau) \sum_{v=1}^2 \frac{b_3 + b_2 \lambda_k^2 - \phi_{v_k}^2}{\phi_{v_k} (\lambda_k^2 (b_1 + b_2) + b_3 - 2\phi_{v_k}^2)} \cdot \sin \phi_{v_k} (t - \tau) d\tau; \\ \psi(x, t) &= \frac{1}{\rho F} \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^t C_k \cdot P(\tau) \sum_{v=1}^2 \frac{b_3 \lambda_k}{\phi_{v_k} (\lambda_k^2 (b_1 + b_2) + b_3 - 2\phi_{v_k}^2)} \cdot \sin \phi_{v_k} (t - \tau) d\tau, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } \phi_{1k} = \sqrt{0.5 \left(-(\lambda_k^2 (b_1 + b_2) + b_3) + \sqrt{(\lambda_k^2 (b_1 + b_2) + b_3)^2 - 4b_1 b_2 \lambda_k^4} \right)};$$

$$\phi_{2k} = \sqrt{0.5 \left(-(\lambda_k^2 (b_1 + b_2) + b_3) - \sqrt{(\lambda_k^2 (b_1 + b_2) + b_3)^2 - 4b_1 b_2 \lambda_k^4} \right)} \quad - \text{ выражения для определения}$$

$$\text{собственных частот колебаний; } \lambda_k = \frac{k\pi}{l}; \quad b_1 = \frac{k'G}{\rho}; \quad b_2 = \frac{E}{\rho}; \quad b_3 = \frac{k'GF}{\rho I}.$$

Таким образом, найденные собственные частоты колебаний исследуемой балки ϕ_k : 243.1, 963.1, 2133.9, 3716.7, 5665.5, 7932.5, 10471, 13240, 16201, 19324 Гц и т.д.

Собственные частоты колебаний стержня с одной степенью свободы (перемещение вдоль продольной оси симметрии) могут быть определены, например, с использованием метода конечных элементов. Первые десять собственных частот при этом составили: 11004, 22005, 33001, 43989, 54967, 65930, 76877, 87805, 98712, 109594 Гц.

Известно, что распространение деформации в материале имеет волновой характер, при этом скорость распространения волн деформации в материале может быть найдена по

следующей зависимости

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3)$$

где E - модуль упругости, ρ - плотность материала.

Таким образом время, за которое волна деформации проходит расстояние от датчика до границы исследуемого элемента (расстояние l) и возвращается обратно (отраженная волна) может быть найдено как отношение $2l/V$, а соответствующая этому времени частота прохождения волны $\nu = V/2l$. В результате получаем зависимость следующего вида:

$$\phi_{\text{волны}} = \sqrt{\frac{E}{4\rho l^2}} \cdot \quad (4)$$

Определенные по зависимости (4) частоты прохождения прямых и отраженных волн приведены в таблице 1 в направлениях x , y , z соответственно рисунка 1, а).

Так как измерение деформаций происходит на стержне вдоль оси y , а на балке вдоль оси x , то наибольшее внимание необходимо уделять частоте прохождения отраженной волны деформации именно в этих направлениях (см. табл. 1). Частота выборок АЦП при этом должна быть в несколько раз выше упомянутых ранее частот.

Таблица 1

Объект	Частота прохождения волны, Гц		
	x	y	z
Стержень	166268	10188	166268
Балка	10188	96542	81715

При исследовании процесса деформирования контактирующих между собой объектов с использованием тензометрического метода необходимо учитывать скорость движения ударника, так как с ее ростом увеличивается скорость деформирования. Приближенное значение времени контакта можно найти приравняв к нулю первые два члена зависимости между силой динамического взаимодействия и временем [5]. Полученное выражение будет иметь вид:

$$t_{\text{конт}} = 5 \sqrt{\left(\frac{64 \cdot m \cdot k^{3/2}}{3 \cdot \sqrt{\pi} \cdot V_0} \right)^2},$$

где m – масса падающего стержня;

$k = \sqrt[3]{\frac{9}{4} \cdot \frac{(1-\mu^2)^2}{E^2 \cdot R}}$ – константа, учитывающая кривизну тела и свойства материала;

$V_0 = \sqrt{2gh}$ – начальная скорость стержня.

Соответствующая времени $t_{\text{конт}}$ частота составляет $\phi_{\text{конт}} = 6979$ Гц.

Исходя из приведенной информации установлено, что для фиксации деформаций исследуемых элементов с достаточной точностью можно использовать серийно выпускаемый аналогово-цифровой преобразователь ADA-

1406 со следующими характеристиками [6]:
 – разрядность АЦП – 14 бит;
 – входной диапазон – ± 10 В, ± 5 В, $\pm 2,5$ В, $\pm 1,25$ В, ± 1 В, $\pm 0,1$ В, $\pm 0,01$ В;
 – максимальная частота дискретизации – 350 кГц;
 – максимальная дифференциальная нелинейность преобразования – $-1 \dots 1,5$ МЗР;
 – максимальная интегральная нелинейность преобразования – $-1 \dots 1,5$ МЗР;
 – количество аналоговых входов – 8 дифференциальных или 16 однопроводных.

На основе приведенных характеристик можно определить разрешающую способность АЦП. Для диапазона измерений $\pm 0,01$ В разрешающая способность равна $\frac{2 \cdot 0,01}{2^{14}} = 1,22 \cdot 10^{-6}$ В.

В виду малости деформаций исследуемых объектов, а следовательно и малого изменения сопротивления активных тензорезисторов, для изменения масштаба выходного сигнала необходимо применять специальные усилители. В данном исследовании использовался операционный усилитель INA125U с низким температурным дрейфом (максимальное значение 2 мкВ/°С), низким уровнем шума ($38 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$) и программируемым коэффициентом усиления ($0 \dots 10000$). С учетом амплитудно-частотной характеристики выбранного операционного усилителя (рис. 3).

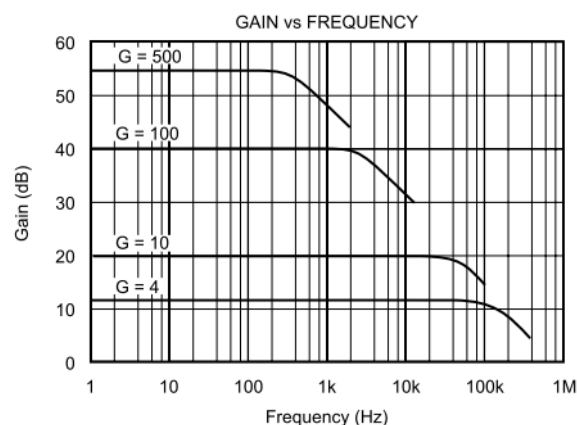


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика усилителя тензомоста

Для исследования напряженно-деформированного состояния механической системы, ввиду необходимости существенного увеличения измеряемого сигнала, необходимо использовать каскад усилителей. В связи с чем,

для измерительного комплекса был спроектирован и изготовлен многокаскадный масштабируемый усилитель.

В случае использования одиночного усилителя с высоким коэффициентом усиления,

измеренные данные будут искажены. На рис. 4 и 5 в сравнении приведены зафиксированные данные с использованием одного усилителя (тонкая кривая) и каскада усилителей (жирная кривая) при измерении деформаций стержня и балки соответственно.

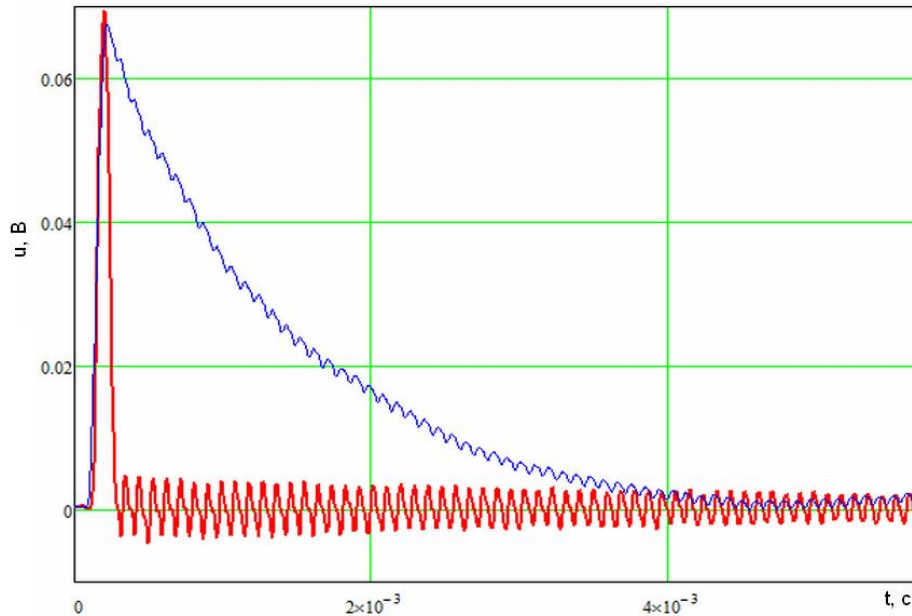


Рис. 4. Зависимость полученного при измерении деформаций стержня сигнала от времени

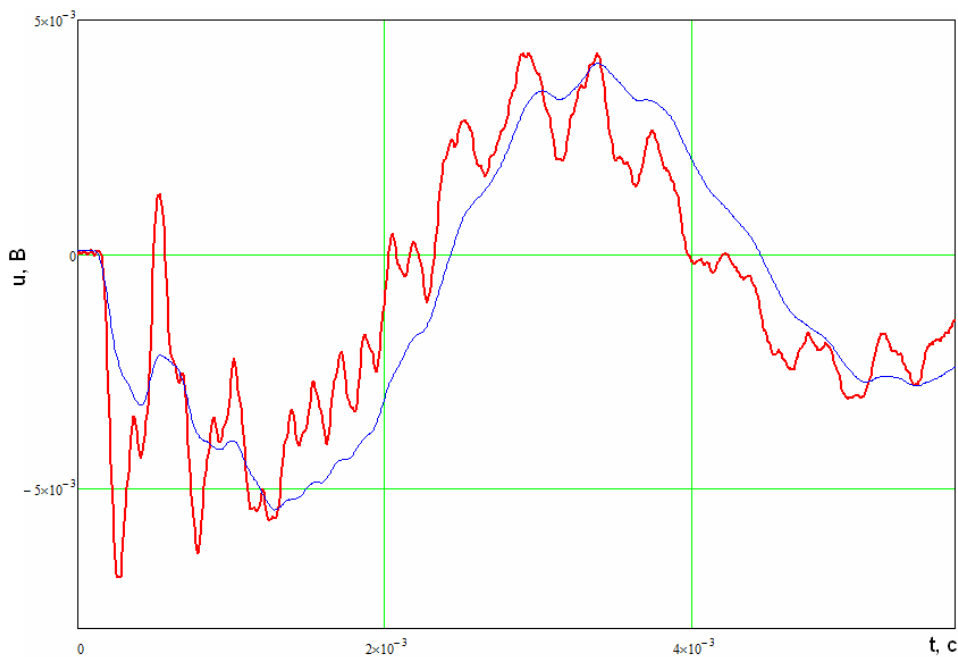


Рис. 5. Зависимость полученного при измерении деформаций балки сигнала от времени

Как видно из рис. 4, 5 использование однокаскадных усилителей с высоким коэффициентом усиления при измерении параметров быстро протекающих процессов не эффективно.

Выводы

Применение предлагаемого измерительного комплекса позволило произвести экспериментальную оценку напряженно-деформиру-

емого состояния упруго-деформируемых элементов конструкций при ударном нагружении с обеспечением достаточной точности в требуемом частотном диапазоне. Таким образом для экспериментального исследования описанной механической системы был создан измерительный комплекс с использованием серийно выпускаемого АЦП ADA-1406 совместно с разработанным многокаскадным масштабируемым усилителем на базе микросхемы INA125U, применение которых позволило реализовать требуемые показатели при минимальных материальных затратах.

Литература

1. Кильчевский Н. А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар / Н. А. Кильчевский. – К.: Наук. думка, 1976. – 320 с.
2. Расторгуев Г. И. Идентификация форм импульсов при поперечном ударе по композитным балкам и пластинам / Г. И. Расторгуев, С. И. Снисаренко // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 6. – С. 126-133.
3. Угримов, С.В. Моделирование низкоскоростного удара по слоистым ортотропным пластинам. Обобщенная теория / Угримов С.В., Шупиков А.Н. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Динаміка та міцність машин №69 – Вестник НТУ "ХПИ", 2010.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Физматгиз, 1967. – 444 с.
5. Кильчевский Н. А. Теория соударений твердых тел / Н. А. Кильчевский. – К. : Наук. думка, 1969. – 247 с.
6. ADA-1406 Модуль ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов. Руководство пользователя. ООО «ХОЛИТ Дэйта Системс». Киев. – 17с.

Рецензент: А.С. Шарапата, доцент, к.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 21.10.2015 г.