



УДК 621.86/.87

А.А. Мирошников, Л.Я. Будиков, П.Н. Рекиян
ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный
университет им. В. Даля»
г. Луганск, Украина
E-mail: topalexengineering@gmail.com
Дата поступления 21.11.2018

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОМЕТРИИ НА БАЗЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Аннотация

Изложена методика тензометрии для усовершенствования метода статических испытаний грузоподъемных кранов мостового типа, позволяющая получать и накапливать информацию о напряженно-деформированном состоянии несущих металлоконструкций, используемую при оценке остаточного ресурса кранов. Существуют серьезные проблемы в области технической диагностики грузоподъемных машин, отработавших нормативный срок. На сегодняшний день отсутствует единая методика оценки остаточного ресурса металлических конструкций кранов. Также нет четких норм снижения несущей способности металлоконструкций как при коррозионных, так и усталостных разрушениях. Проблема в том, что коррозионный износ поддается определению путем замеров фактической толщины стенки как ультразвуковым способом, так и мерительным инструментом, то усталостное состояние металла, кроме трещинообразования, не определяется. Кафедра подъемно-транспортной техники Луганского национального университета им. В. Даля с 1973 года проводит экспертные обследования грузоподъемных кранов, выработавших нормативный ресурс. Кафедра обладает огромной научно-исследовательской лабораторией, позволяющей разрабатывать и испытывать новые методики оценки остаточного ресурса грузоподъемных машин в том числе и с развитием современной аппаратуры.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние металлоконструкции, АЦП, тензометрия, кран-балка, тарировка, мостовой кран.

Введение

Методы исследования на базе электротензометрического оборудования получили широкое распространение в технике. С помощью данной методики возможно изучить работу огромного спектра машин, механизмов и оборудования, в производственных условиях. Возможно, исследование медленно и быстро протекающих процессов, мониторинг во времени деформации и напряжения, скорости, ускорения и т.д. Металлоконструкции грузоподъемных машин, отработавших свой нормативный срок, требуют особого контроля. На сегодняшний день отсутствует единая методика оценки остаточного ресурса [1,2]. Использование тензометрии при испытаниях машин в реальных условиях эксплуатации

дает возможность наглядно регистрировать значения деформаций во времени.

Основная часть

Цель данной статьи показать возможное применение тензометрического комплекса на базе аналого-цифрового преобразователя АЦП «Е14-140-М» ООО «ЛКАРД» г. Москва в паре с персональным компьютером, на который установлен программный пакет «PowerGraph» (ПаверГраф) [3-5]. Программы входящие в состав этого пакета обладают аппаратной независимой архитектурой, настройка физических выходов однополюсных или дифференциальных. Проведение калибровки входных сигналов для преобразования единиц измерения каждого канала. Общие настройки регистрации данных предусмат-

ривают выбор произвольного набора каналов, использование любых частот дискретизации, поддерживаемых устройством, а также использование аппаратной и программной синхронизации [6-8].

Установка тензодатчиков производится исходя из мостовой схемы расположения (рисунок 1.).

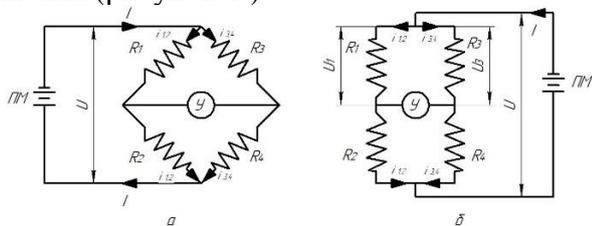


Рисунок 1. Электрическая схема моста Уитстона

Основная цель такой схемы заключается в преобразовании изменения электрического сопротивления тензодатчика в электрический ток или напряжение [9,10]. Согласно этому измеряемая величина преобразуется в изменение сопротивление датчика, после чего это изменение преобразуется в электрический ток. Как правило требуется высокая чувствительность тензомоста.

Ток в измерительной диагонали можно представить в виде (2):

$$I_U = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_U (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_3 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}; \quad (2)$$

Наглядно видно, что сила тока в измерительной диагонали моста зависит от величины сопротивления плеч, сопротивления измерительной диагонали и напряжения питания моста. Максимальное значение тока в измерительной диагонали будет достигнуто при таком значении R_U которое удовлетворяет условию (3):

$$R_U = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_3} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}; \quad (3)$$

При использовании тензометрии это условие должно выполняться. Подставим в уравнение тока измерительной диагонали моста (2) значение R_U (3), тогда:

$$I_U = \frac{U}{2} \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)}. \quad (4)$$

Рассмотрим величину тока в измерительной диагонали при измерении деформации

В данном случае начальное сопротивление датчика $R = 100 \text{ Ом}$, коэффициент тензочувствительности $s = 2$ и $\xi = 5 \cdot 10^{-7}$, найдем, что $\Delta R = s \xi R = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 100 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$. Следовательно, для стали с модулем упругости $2 \cdot 10^6$ и напряжением $0,1 \text{ МПа}$ абсолютное изменение сопротивления датчика с начальным сопротивлением 100 Ом . Составит $2 \cdot 10^{-4}$. Такое не большое изменение сопротивления порождает ток малой силы, чтобы его измерить требуется качественное оборудование. С помощью современного измерительного комплекса АЦП это не составит большого труда. Допустим, что R_1, R_2, R_3, R_4 -сопротивление плеч моста в Омах, R_U – сопротивление измерительной диагонали, U – напряжение питания моста в вольтах, ПМ – (питание моста) источник электрического тока, $У$ – усилитель. Если рассмотреть данную схему в другом виде (см. рисунок 1.б), то видно, что плечи моста параллельны, электрическое напряжение в таком случае одинаково, а токи определяются по закону Ома (1):

$$i_{1,2} = \frac{U}{R + R_2} a, \quad \text{и} \quad i_{3,4} = \frac{U}{R + R_4} a; \quad (1)$$

ций датчика мостовой схемы в нашем случае: $R_1=R_2=R_3=R_4$ и $R' = R''$. Пусть датчик включен в первое плечо имеет начальное сопротивление R_1 . После деформации сопротивление датчика изменится на величину ΔR , тогда:

ток в измерительной диагонали (5):

$$I_U = (U/(8R)) \cdot (\Delta R/R);$$

так как:

$$U/(2R) = i_0$$

то:

$$I_U = \frac{1}{4} i_0 \frac{\Delta R}{R}.$$

где i_0 - ток в датчике.

При $R' = R''$ получаем:

$$k = 2 / (1 + (R''/R')).$$

Сопротивление R'' может быть $R' > R''$ или $R' < R''$ принимаемого за параметр.

$R' < R''$ - ведет к снижению коэффициента k и, следовательно к уменьшению тока в измерительной диагонали моста, k - характеризует чувствительность моста. График изменения этого коэффициента в функции отношения R''/R' показан на рисунке 2.

R_3 и R_4 - сопротивления плеч обозначенные через R'' , следует делать меньше, чем R' . Для R'' - нижний предел ограничивается возможностью построения измерительного комплекса, верхний предел не должен быть больше R' . В конечном итоге соотношения плеч должны удовлетворять условию: $R'' \leq R'$, коэффициент чувствительности моста $k \geq 1$.

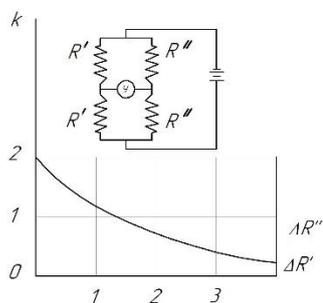


Рисунок 2. Диаграмма изменения коэффициента чувствительности моста.

Рассмотрим лабораторную установку кран-балки коробчатого сечения. Данная металлоконструкция моделирует классическую главную балку мостового крана. Напряженно-деформированное состояние при действии нагрузки в 1 т., исследовано в программном комплексе SolidWorks Simulation [11,12,13]. Исходя из чего полученные результаты напряженно-деформированного состояния позволяют довольно точно рассчитать ток в измерительной диагонали датчиков тензомоста.

Рассмотрим зону, на которую наклеен датчик, а именно среднее сечение нижнего пояса кран-балки. Результаты расчета показали напряжение $\sigma = 72$ МПа. Благодаря этому можно предварительно вычислить ток в измерительной диагонали. Модуль упругости для ст.3 составляет $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа. Коэффициент чувствительности датчика $s = 2$. Сопротивление датчика $R = 100$ Ом. Напряжение питания моста 5В. Сопротивление плеч $R_1 + R_2 = R''$ где $R'' = 200$ Ом.

Относительная деформация детали:

$$\xi = \sigma/E = 72/(2,1 \cdot 10^5) = 3,43 \cdot 10^{-4}$$

Относительное сопротивление изменения датчика:

$$\frac{\Delta R}{R} = S\xi = 2 \cdot 3,43 \cdot 10^{-4} = 6,9 \cdot 10^{-4}$$

Коэффициент чувствительности моста $k = 1$.

Ток в датчике:

$$i_0 = U/(2R) = 5/(2 \cdot 200) = 0,013 A$$

Ток в измерительной диагонали:

$$I_U = \frac{1}{4} \cdot k i_0 \frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{4} \cdot 1 \cdot 0,013 \cdot 6,9 \cdot 10^{-4} = 2,15 \text{ мкА}$$

В случае если в измерительную диагональ моста включается прибор с бесконечно большим сопротивлением, приведенные уравнения не будут справедливы для расчета. Тогда о величине неуравновешенности моста судят по разности потенциалов на вершинах измерительной диагонали.

Если сопротивление R_1 (см. рис.1) получит приращение ΔR , то ток в плечах R_1 и R_2 будет (5):

$$i_{1,2} = U/(R_1 + R_2 + \Delta R); \quad (5)$$

Падение напряжения на сопротивлении R_1 (6):

$$U_1 = \frac{U(R_1 + \Delta R)}{R_1 + R_2 + \Delta R}; \quad (6)$$

Падение напряжения на сопротивлении R_3 (7):

$$U_3 = UR_3/(R_3 + R_4); \quad (7)$$

Разность потенциалов на измерительной диагонали (8):

$$\Delta U = U_3 - U_1 = -\frac{UR_3}{R_3 + R_4} + \frac{U(R_1 + \Delta R)}{R_1 + R_2 + \Delta R} \quad (8)$$

В нашем случае $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, получаем (9):

$$\Delta U = U \frac{\Delta R/R}{4 + 2 \cdot (\Delta R/R)} \quad \Delta U \approx \frac{1}{4} U \frac{\Delta R}{R}; \quad (9)$$

Из условия равновесия моста $R_1 R_4 - R_2 R_3 = 0$, видно, что ток в измерительной диагонали, и напряжение увеличивается в два раза, если сопротивление R_1 возрастает, а сопротивление R_2 , настолько же уменьшится. Если увеличится сопротивление R_4 , а R_3 настолько же уменьшится, то ток в измерительной диагонали моста увеличится в четыре раза сравнительно с тем случаем,

когда изменится сопротивление только у одного плеча.

Исходя из вышесказанного запишем формулу в виде (10):

$$I_U = \frac{1}{4} i_0 \frac{\Delta R}{R} \text{ и } \Delta U \approx \frac{1}{4} U \frac{\Delta R}{R} \text{ или } I_U = k c i_0 \frac{\Delta R}{R} \text{ и } \Delta U = k c U \frac{\Delta R}{R}; \quad (10)$$

Коэффициент c в обеих формулах при изменении одного двух и четырех плеч принимает значения: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1. Тогда отношение токов и напряжений в измерительной диагонали моста в зависимости от количества работающих плеч будет иметь вид (11):

$$I_{U1} : I_{U2} : I_{U4} = \frac{1}{4} : \frac{1}{2} : 1 = \Delta U_1 : \Delta U_2 : \Delta U_4; \quad (11)$$

Таким образом, ток или напряжение в измерительной диагонали моста можно увеличить за счет количества активных плеч в 2 или 4 раза.

Характеристика мостовой схемы

В характеристику мостовой схемы относятся такие параметры как сопротивление плеч R_1, R_2, R_3, R_4 , количество активных плеч, сопротивление которых изменяется вместе с изменением измеряемой величины. Фактор чувствительности моста c – зависящий от количества активных плеч. Чувствительность моста по току (12):

$$I_U / (\Delta R / R) = k c i_0; \quad (12)$$

Чувствительность моста по напряжению (13):

$$\Delta U / (\Delta R / R) = k c U; \quad (13)$$

Рассмотрим тарировочную балку (рисунок 3).

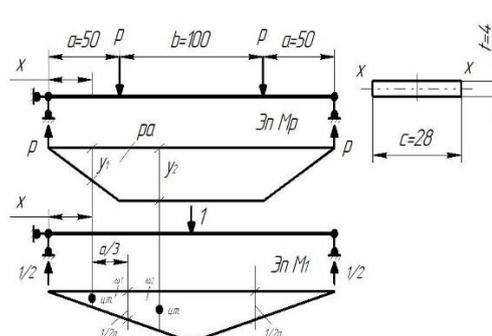


Рисунок 3. Эпюры тарировочной балки эп. M_p -грузовая, эп. M_l - единичная.

На базе этой балке можно вычислить зависимость между прогибом под нагрузкой и изменением силы тока в измерительной диагонали тензодатчиков. Это нужно для того, чтобы определить напряжение в лабораторной кран-балке. Построенный график зависимости $\sigma = F(f)$ (рис.4) позволит наглядно с минимальной погрешностью это сделать. Главным условием данной зависимости изменения силы тока в тарировочной балке и лабораторной, является наклейка тензодатчиков с одной партии с одним и тем же сопротивлением в нашем случае $R = 100$ Ом.

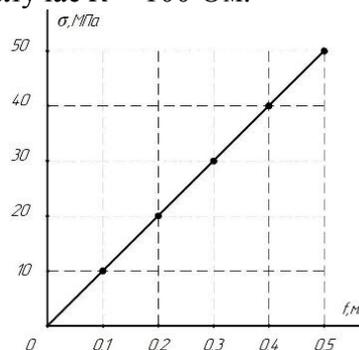


Рисунок 4. – Зависимость $\sigma = F(f)$ для тарировочной балки

Момент инерции балки:

$$I_x = c \cdot t^3 / 12;$$

Напряжения можно вычислить по формуле:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{P \cdot a}{I_x} = \frac{P \cdot a \cdot (t/2)}{I_x};$$

Для этого можно воспользоваться интегралом Мора:

$$f = 2 \int_0^{l/2} \frac{M_p \cdot M_1 \cdot dx}{EI_x} = \frac{2}{EI_x} (\omega_1 \cdot y_1 + \omega_2 \cdot y_2);$$

или правилом Верещагина перемножения эпюр:

$$f = 2 \left(\frac{\omega_1 \cdot y_1}{EI_x} + \frac{\omega_2 \cdot y_2}{EI_x} \right) = \frac{2}{EI_x} (\omega_1 \cdot y_1 + \omega_2 \cdot y_2);$$

$$\frac{2}{EI_x} \left(\frac{1}{2} \cdot a \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot \frac{2}{3} \cdot P \cdot a + \frac{(a/2) + (l/4)}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot P \cdot a \right) = \frac{2}{EI_x} \left(\frac{P \cdot a^3}{6} + \frac{a + (l/2)}{4} \cdot \frac{b}{2} \cdot P \cdot a \right);$$

$$\frac{1}{EI_x} \left(\frac{P \cdot a^3}{3} + \frac{2 \cdot a + l}{4} \cdot \frac{b}{2} \cdot P \cdot a \right) = \frac{1}{EI_x} \left(\frac{P \cdot a^3}{3} + \frac{2 \cdot a}{4} \cdot \frac{P \cdot a \cdot b}{2} + \frac{b \cdot l \cdot P \cdot a}{8} \right);$$

$$\frac{1}{EI_x} \left(\frac{P \cdot a^3}{3} + \frac{P \cdot a^2 \cdot b}{4} + \frac{P \cdot a \cdot b \cdot l}{8} \right) = \frac{P \cdot a}{EI_x} \left(\frac{a^2}{3} + \frac{a \cdot b}{4} + \frac{b \cdot l}{8} \right);$$

$$\frac{M}{EI_x} \left(\frac{a^2}{3} + \frac{a \cdot b}{4} + \frac{b \cdot l}{8} \right) = \frac{M}{EI_x} \cdot A = \frac{\sigma \cdot W_x}{EI_x} \cdot A = \frac{\sigma \cdot I_x}{(t/2) \cdot EI_x} \cdot A = \frac{2 \cdot \sigma}{t \cdot E} \cdot A;$$

В конечном результате получаем коэффициент зависимости перемещения прогиба балки от напряжения (на базе чего построен график рисунок 4):

$$\sigma = f \cdot (E \cdot t / (2 \cdot A)) = f \cdot (2,1 \cdot 10^5 \cdot 4 / (2 \cdot 4583)) = 91,6 f$$

Выводы

При измерении величин с помощью тензометрических методов наклейки датчиков по мостовой схеме следует знать важные свойства:

1. Равные по величине и знаку изменения сопротивлений всех четырех плеч не нарушают равновесия моста, если начальные сопротивления плеч равны.
2. Равные по величине и по знаку изменения сопротивлений смежных плеч (R1,R2,R3,R4) не выводят мост из равновесия, если R1=R2 и R3=R4.
3. Равные по величине и разные по знаку изменения сопротивлений в смежных плечах удваивают неуравновешенность моста, а, следовательно, и ток в измерительной диагонали (чувствительность моста $c = 2$).
4. Допустим, что четные номера сопротивления плеч получают приращение одного знака, а не четные аналогичные по величине приращения с противоположным знаком, то баланс моста нарушается увеличением в четыре раза (чувствительность $c = 4$)
5. Можно производить сложение и вычитание приращений сопротивлений плеч моста, так как сопротивления в одном плече складываются алгебраически.

Все вышеописанные характеристики максимально увеличивают возможность применение мостовой тензоэлектрической схемы на базе современной виртуальной измерительной аппаратуры, для всевозможных задач поиска характеристик той или иной машины, например, для освещенных вопросов в работах [14, 15].

Библиографический список

1. Мирошников А.А., Будиков Л.Я. Оценка остаточного ресурса мостовых кранов применением CALS технологий и методов численного анализа. Материалы Международной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых «Транспортные системы и современные технологии», посвященной 97-й годовщине образования Луганского национального университета имени Владимира Даля. Луганск 2017.
2. Усовершенствование метода статических испытаний мостовых кранов позволит получать важные параметры оценки их остаточного ресурса / Будиков Л. Я., Мирошников А. А., Криничный П. Ю. // Подъемно-транспортное дело. – 2018, № 1-2, стр. 10-13.
3. Гарманов А.В. Подключение измерительных приборов / А.В. Гарманов – Москва: 2003. – 41с.

4. Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph / Д.Ю. Измайлов // промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2007. - №3. – С 42-47.
5. Измайлов Д.Ю. Виртуальная измерительная лаборатория PowerGraph / Измайлов Д.Ю. // промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2007. - №3. – С 42-47.
6. PowerGraph. Руководство пользователя. URL: <http://www.powergraph.ru>
7. Парахуда, Р. Н. Автоматизация измерений и контроля: курс лекций / Р. Н. Парахуда, В. И. Шевцов – СПб. : СЗТУ, 2002. – 75 с.
8. Путилин, А. Б. Вычислительная техника и программирование в измерительных информационных системах: учебное пособие для вузов / А. Б. Путилин. – М. : Дрофа, 2006. – 447 с.
9. Девин Л.Н. Применение пакета PowerGraph для исследования процесса резанья / Девин Л.Н., Сулима А.Г. // Промышленные измерения, контроль, автоматизация, диагностика. – 2008. - №3. – С 24-26.
10. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии / В.А. Шушкевич. - Минск: Высшая школа, 1975. - 352 с.
11. ГОСТ 32579.5-2013. Краны грузоподъемные. Принципы формирования расчетных нагрузок и комбинаций нагрузок. Часть 5. Краны мостового типа. – М.: Стандартиформ, 2015.-15с.
12. ГОСТ 33169-2014. Краны грузоподъемные. Металлические конструкции. Подтверждение несущей способности. -М.: Стандартиформ, 2015. – 30 с.
13. ISO 5817:2003 Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) — Quality levels for imperfections (Сварка. Сварные соединения из стали, никеля, титана и их сплавов, полученные сваркой плавлением (исключая лучевые способы сварки). Уровни качества)
14. Шишкарев М.П. Выбор адаптивных фрикционных муфт для приводов машин металлопрокатного производства // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2018, № 1(10), стр, 40-53.
15. Улучшение эксплуатационных характеристик стальных режущих инструментов сложного профиля, упрочнённых комбинированной магнитно-импульсной обработкой / А.М. Милюкова, А.И. Горчанин, И.В. Буриосов, Г.П. Горещкий // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2018, № 1(10), стр, 17-22.

Information about the paper in English

A.A.Miroshnikov, L. Y. Budikov, P.N. Rekiyan
 Lugansk National University named after V. Dahl
 Lugansk Ukraine
 E-mail: topalexengineering@gmail.com
 Received 21.11.2018

ANALYSIS OF THE STRESS AND STRAIN STATE OF STEEL STRUCTURES USING AN
 ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER-BASED STRAIN MEASURING DEVICE

Abstract

The paper presents the procedure of strain measuring to improve a method of static tests of EOT cranes to get and collect information about the stress and strain state of supporting steel structures used to evaluate the remaining lifetime of cranes. There are serious difficulties with a technical diagnosis of lifting machines with the expired rated lifetime. At present there is no unified procedure to evaluate the remaining lifetime of crane steel structures. There are no clear norms of decreasing the carrying capacity of steel structures with regard to corrosion and fatigue fractures. The problem is that corrosive wear may be determined by measuring actual wall thickness by an ultrasonic method as well as by a measuring tool; steel fatigue, excluding crack formation, cannot be determined. Since 1973 the Department of Lifting and Handling Equipment of Dal Lugansk National University examines cranes with the expired rated lifetime. The department has a great research laboratory to develop and test new procedures to evaluate the residual lifetime of lifting machines, including with modern tools.

Keywords: stress and strain state of the steel structure, ADC, strain measuring, overhead hoist, calibration, EOT crane.