

А. К. ТУЛЕШОВ*, **А. А. ДЖОМАРТОВ**, **А. Н. КАМАЛ**, **А. Е. АБДУРАИМОВ**

*Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, Almaty, Kazakhstan
e-mail: aman_58@mail.ru, legsert@mail.ru, kan77705@gmail.com,
zizo_waterpolo@mail.ru*

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ, МАШИН И РОБОТОВ

В работе показана тензометрическая система измерения для экспериментального исследования механизмов, машин и роботов. Тензометрическая система измерения построена на базе интеллектуальных цифровых датчиков серии ZETSENSOR с интерфейсом CAN. Алгоритм обработки информации, и визуализация измеренных сигналов осуществляется при помощи программного обеспечения ZETLAB SENSOR. Тензометрическая система измерения применяется для определения таких параметров, как: перемещение, силы, деформации и напряжения в звеньях механизмов, машин и роботов. Тензометрическая система измерения была использована для экспериментального исследования кривошипного пресса. Полученные экспериментальные результаты подтвердили простоту и удобство ее использования для динамических измерений

Ключевые слова: тензометрическая система измерения, цифровой датчик, тензорезистор, напряжение, сила, деформация, нагрузка,

Введение. Для экспериментального исследования механизмов, машин и роботов широко используются тензодатчики [1-4]. Когда тензодатчик встраивается в узлы и детали машины, деформированное состояние можно наблюдать в реальном времени с помощью внешних измерительных систем [5,6]. Тензометрирование механизмов, машин, роботов необходимо для оценки напряженно-деформируемого состояния их элементов и узлов при различных режимах работы. При этом исследуются: условия реальной работы деталей, узлов и несущей конструкции для проверки и оптимизации расчетных схем; определения фактических внешних статических и динамических нагрузок; проверка соответствия напряженно-деформируемого состояния расчетным данным; определение количественных показателей надежности узлов и деталей машины при различных режимах работы [7].

В Институте механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, возникла необходимость разработки тензометрической системы измерения, для экспериментального исследования механизмов, машин и роботов. Отличительной особенностью тензометрической системы измерения, является применение интеллектуальных цифровых датчиков ZETSENSOR [8]. С помощью устройств данного семейства возможно построение распределенных измерительных сетей, в отличие от централизованных схем измерений [8]. Система ТСИ позволит осуществить замеры следующих параметров: перемещение, силы, деформации и напряжения в звеньях механизмов, машин и роботов.

Методы и материалы исследования. На рисунке 1 показана конфигурация тензометрической системы измерения (ТСИ), для экспериментального исследования ме-

* E-mail корреспондирующего автора: aman_58@mail.ru

ханизмов, машин и роботов. ТСИ построена на базе интеллектуальных цифровых датчиков серии ZETSENSOR с интерфейсом CAN.

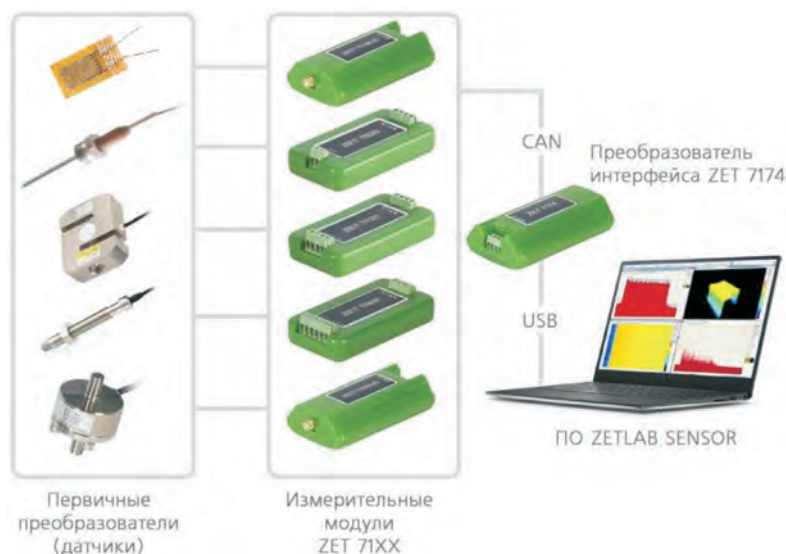


Рисунок 1 – Конфигурация ТСИ для экспериментального исследования механизмов, машин и роботов

Измерение силы осуществляется с помощью цифрового датчика силы, который состоит из первичного преобразователя (тензодатчик UU) и измерительного модуля ZET 7111. Для измерения деформаций и напряжений в звеньях механизмов, машин, роботов, применяются фольговые тензорезисторы. Тензорезисторы наклеиваются на звенья механизмов, машин, роботов, в которых необходимо определить напряжения возникающие в процессе работы. Сигналы с датчиков обрабатываются измерительными модулями ZET 7111, которые передают измеренные значения через шину CAN 2.0 преобразователю интерфейса ZET 7174 и далее к компьютеру по интерфейсу USB 2.0.

Цифровой измерительный модуль ZET 7111 предназначен для измерения относительной деформации с помощью первичных преобразователей, выполненных на базе тензорезисторов. К цифровому измерительному модулю ZET 7111 могут подключаться либо готовые тензодатчики (датчики силы, датчики крутящего момента), либо отдельные тензорезисторы, подключаемые по полумостовой либо мостовой схеме. Питание датчика осуществляется напряжением переменного тока, таким образом, с помощью ZET 7111 проводятся динамические измерения. Внутри цифрового измерительного модуля ZET 7111 реализован алгоритм обработки информации, по аналогии с функционалом программы «Тензомер» и визуализация измеренных сигналов осуществляется при помощи программ «Вольтметр постоянного тока», «Многоканальный самописец» и др., входящих в состав программного обеспечения ZETLAB SENSOR [8]. При необходимости визуализации большого количества измерительных каналов используется программа «Многоканальная измерительная система». В за-

висимости от настройки программы, результатами измерений может быть сила, вес, перемещение, крутящий момент и другие параметры.

Цифровой тензодатчик состоит из первичного преобразователя (тензодатчика или тензомоста) и измерительного модуля ZET 7111. Тензодатчик устанавливается в месте измерений, измерительный модуль — в непосредственной близости. Датчики крепятся на объекте измерений, а модули, которые обеспечивают передачу информации располагаются в электротехнических шкафах. Преимуществом модулей ZETSENSOR является легкий монтаж и демонтаж, а так же индикация питания и передача сигнала, что в свою очередь облегчает диагностику системы на объекте. На выходе тензодатчика формируется напряжение, пропорциональное воздействию измеряемой величины. Измерительный модуль осуществляет преобразование этого напряжения в значения измеряемой величины и передает результаты в цифровом виде. Таким образом, для проведения измерений не требуется ни настраивать датчик, ни обрабатывать результаты - все необходимые настройки сохраняются в памяти модуля ZET 7111 и измерения производятся сигнальным процессором, входящим в состав измерительного модуля ZET 7111.

Выбор первичного преобразователя определяется решаемой задачей. Цифровые датчики с измерительным модулем ZET 7111 измеряют значение относительной деформации (при использовании тензомостов, рисунок 2 а) или значение воздействующих сил (при использовании тензодатчика, рисунок 2 б). Возможно конфигурирование цифрового датчика для измерения других величин, например, напряженности, крутящего момента, давления, веса.



Рисунок 2 – Цифровые датчики с измерительным модулем ZET 7111:
а) с использованием тензомостов; б) с использованием тензодатчика

Для подключения измерительной сети к системам ZETLAB и ZETVIEW используется преобразователи интерфейса. Возможны варианты подключения по USB (ZET 7174), Ethernet/Wi-Fi (ZET 7176) или по GSM (ZET 7177), рисунок 3. Количество датчиков подключаемых к модулю ZET 7174 не более 4. Программное обеспечение ZETLAB поддерживает подключение до 200 цифровых датчиков к одному компьютеру. Измерительные сети также могут подключаться к любой системе по интерфейсу CAN 2.0.

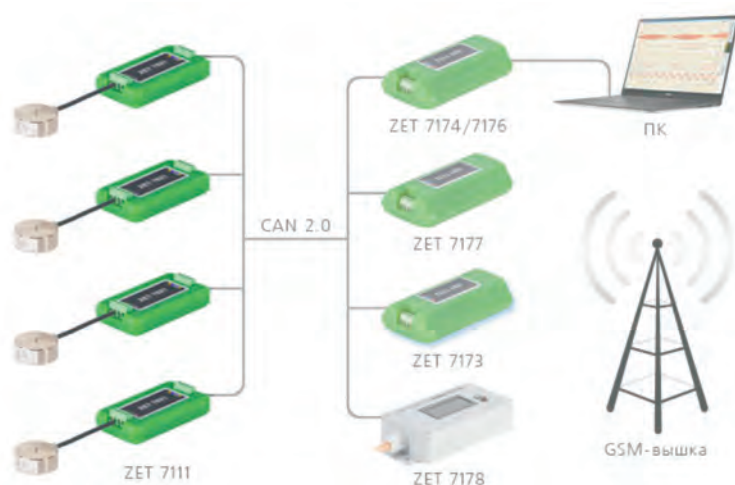


Рисунок 3 – Схема подключения измерительной сети к системам ZETLAB

При построении измерительной сети, цифровые датчики с интерфейсом CAN 2.0 подключаются последовательно. Образовавшаяся измерительная цепочка из цифровых датчиков, подключается к компьютеру при помощи преобразователя интерфейса ZET 7174.

Тензодатчик силы UU показан на рисунке 4, отличается точностью и компактностью, диапазон измерений от 2 кгс до 10 тс. Принцип действия датчика основан на преобразовании механической силы (растяжение/сжатие) вдоль оси симметрии датчика в пропорциональный электрический сигнал.

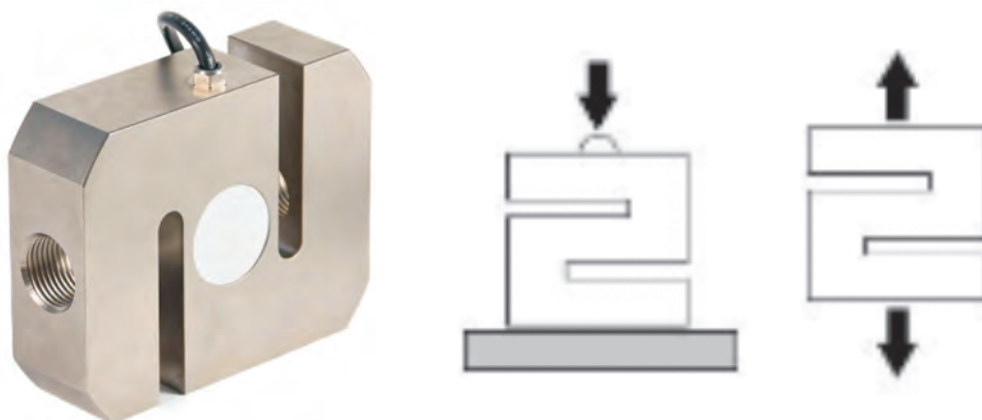


Рисунок 4 – Тензодатчик силы UU

Разработанная ТСИ применялась для экспериментального исследования кривошипного пресса. Испытания проведены на кривошипном прессе JB23-10T со следующими характеристиками: номинальное усилие -100 кН; ход под номинальным

усилием – 4 мм; ход ползуна 50 мм; количество ходов - $1 \div 145 \text{ мин}^{-1}$; скорость электродвигателя – 960 об/мин; мощность электродвигателя -1.5 кВт.

На рисунке 5 показан стенд для экспериментального исследования кривошипного пресса построена на базе ТСИ. Стенд позволяет осуществить замеры напряжений в шатуне и ползуне кривошипного пресса. Для измерения напряжений в шатуне и ползуне кривошипного пресса, в качестве первичных преобразователей, применяются фольговые тензорезисторы. Тензорезисторы наклеиваются на шатун и ползун исполнительного механизма кривошипного пресса, в которых необходимо определить напряжения возникающие в процессе работы. Эти сигналы обрабатываются ТСИ.



Рисунок 5 – Стенд для экспериментального исследования кривошипного пресса

Экспериментальные исследование проводились на кривошипном прессе при следующих параметрах: мощность двигателя 1.8 квт, скорость вращения кривошипа 150 об/мин. Осуществлялась вырубка штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 0.8 мм и 1.6 мм. Операция вырубки проводилась на одиночном ходе кривошипного пресса. Для измерения скорости вращения кривошипа использовался датчик измерения оборотов UT372 (рисунок 6)



Рисунок 6 – Датчик измерения оборотов UT372

1) Для определения напряжения в шатунах кривошипного пресса на него был наклеен тензорезистор (рисунок 5). Размер сечения шатуна в месте наклейки тензорезистора 6.5x6.5 см. На рисунке 7 показан экспериментальный график напряжения в сечении шатуна при вырубке штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 0.8 мм. Максимальное напряжение при вырубке равно $P = 4,95$ МПа. Площадь сечения шатуна в месте измерения равна $4,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, тогда сила в данном сечении равна $F_{\text{ш}}^{\text{max}} = 20914 \text{ Н}$. Вырубка отверстия в стальном листе происходит в окрестности нижней мертвой точки и максимальная сила на ползуне F_n^{max} приблизительно равна максимальной силе в сечении шатуна $F_{\text{ш}}^{\text{max}}$ т.е. $F_n^{\text{max}} \approx F_{\text{ш}}^{\text{max}} = 20914 \text{ Н}$.

На рисунке 8 показан экспериментальный график напряжения в сечении шатуна при вырубке штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 1.6 мм. Максимальное напряжение при вырубке равно $P = 12,75$ МПа. Площадь сечения шатуна в месте измерения равна $4,225 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, тогда сила в данном сечении равна $F_{\text{ш}}^{\text{max}} = 53869 \text{ Н}$. Вырубка отверстия в стальном листе происходит в окрестности нижней мертвой точки и максимальная сила на ползуне F_n^{max} приблизительно равна максимальной силе в сечении шатуна $F_{\text{ш}}^{\text{max}}$ т.е. $F_n^{\text{max}} \approx F_{\text{ш}}^{\text{max}} = 53869 \text{ Н}$.

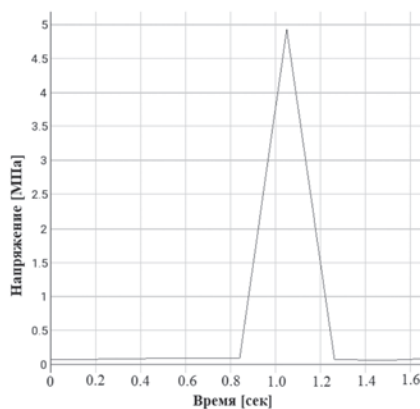


Рисунок 7 – Экспериментальный график напряжения в сечении шатуна, при вырубке штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 0.8 мм

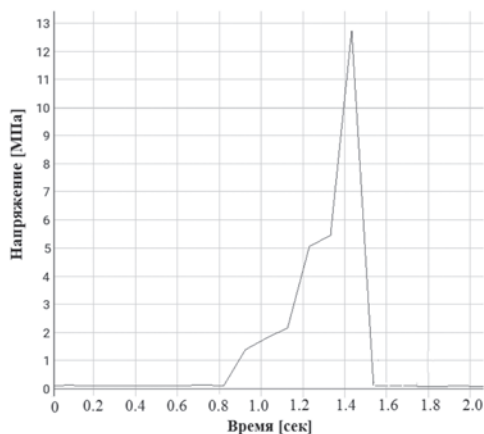


Рисунок 8 – Экспериментальный график напряжения в сечении шатуна, при вырубке штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 1.6 мм

При увеличении толщины стального листа с 0.8 мм до 1.6 мм, сила необходимая для вырубки штампом кривошипного пресса отверстия диаметром 11 мм увеличивается в 2.58 раза.

2) Для определения реакции в направляющих ползуна кривошипного пресса, на ползун перпендикулярно был наклеен тензорезистор (рисунок 5) перпендикулярно направлению его движения. Размер сечения ползуна в месте наклейки тензорезистора 14.5x14.5 см.

На рисунке 9 показан экспериментальный график напряжения в направляющих ползуна кривошипного пресса при вырубке штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 0.8 мм. Максимальное напряжение при вырубке равно $P = 0,141$ МПа. Площадь сечения ползуна в месте измерения равна $0,021$ м², тогда сила в данном сечении равна $F_t^{\max} = 2961$ Н. Считается, что данная сила равна максимальной реакции R_t^{\max} со стороны направляющих ползуна кривошипного пресса.

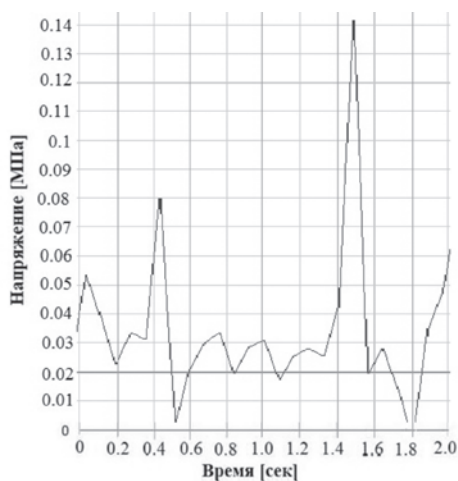


Рисунок 9 – Экспериментальный график напряжения в направляющих ползуна кривошипного пресса при вырубке штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 0.8 мм

По сравнению с максимальной силой на ползуне $F_n^{\max} = 20914$ Н необходимой для вырубки отверстия в стальном листе диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 0.8 мм, максимальная реакция $R_t^{\max} = 2961$ Н со стороны направляющих ползуна кривошипного пресса составляет 14.2% от максимальной силы на ползуне.

На рисунке 10 показан экспериментальный график напряжения в направляющих ползуна кривошипного пресса при вырубке штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 1.6 мм. Максимальное напряжение при вырубке равно $P = 0,305$ МПа. Площадь сечения ползуна в месте измерения равна $0,021$ м², тогда сила в данном сечении равна $F_t^{\max} = 6405$ Н. Считается, что данная сила равна максимальной реакции со стороны направляющих ползуна кривошипного пресса.

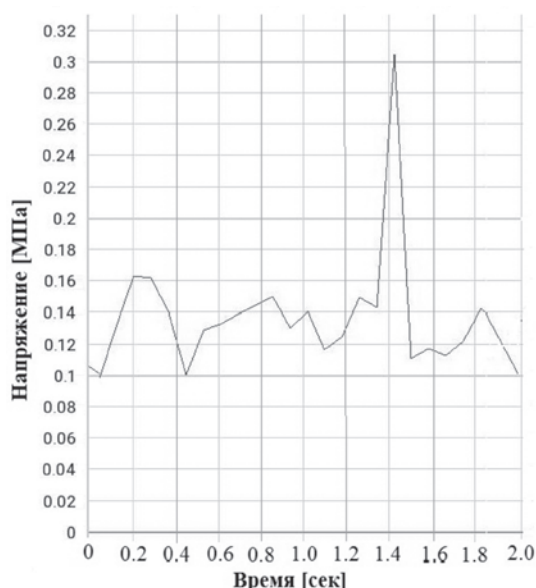


Рисунок 10 – Экспериментальный график напряжения в направляющих ползуна кривошипного пресса при вырубке штампом отверстия диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 1.6 мм

По сравнению с максимальной силой на ползуне $F_n^{\max} = 53869$ Н необходимой для вырубки отверстия в стальном листе диаметром 11 мм в стальном листе толщиной 0.8 мм, максимальная реакция $R_t^{\max} = 6405$ Н со стороны направляющих ползуна кривошипного пресса составляет 11.2% от максимальной силы на ползуне. При увеличении толщины стального листа с 0.8 мм до 1.6 мм, максимальная реакция R_t^{\max} со стороны направляющих ползуна кривошипного пресса, при вырубке штампом кривошипного пресса отверстия диаметром 11, увеличивается в 2.16 раз

Выводы. Разработана тензометрическая система измерения на базе интеллектуальных цифровых датчиков, для экспериментального исследования механизмов, машин и роботов. Тензометрическая система измерения позволяет определить перемещения, силы, деформации и напряжения в звеньях механизмов, машин и ро-

ботов. В тензометрической системе измерения, цифровые датчики с интерфейсом CAN 2.0 подключаются последовательно. Образовавшаяся измерительная цепочка из цифровых датчиков, подключается к компьютеру при помощи преобразователя интерфейса ZET 7174. Отличительной особенностью тензометрической системы измерения является простота ее применения, мобильность и возможность подключения различных типов датчиков. Тензометрическая система измерения применялась при проведении экспериментальных исследований кривошипного пресса. В результате экспериментальных исследований определены напряжения и силы в звеньях кривошипного пресса.

Работа выполнена в рамках грантового проекта AP09259339 финансируемого Министерством образования и науки Республики Казахстан и гранта на проведение фундаментальных исследований ИММаш им. У.А.Джолдасбекова BR20280990.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Hoffman K., 1989, An Introduction to Measurements using Strain Gauges, HBM GmbH, Darmstadt.
- 2 S.F Richard and E.B. Donald, "Theory and Design for Mechanical Measurements," 5th ed. John Wiley & Sons, Inc. Chapter 11: pp. 466, 2011.
- 3 H. Karl, "An Introduction to Measurements using strain gauges," Germany: Druckerei Drach Press, Alsbach. Pp.1-32, 1987.
- 4 S.F Richard and E.B. Donald, "Theory and Design for Mechanical Measurements," 5th ed. John Wiley & Sons, Inc. Chapter 11: pp. 466, 2011.
- 5 Hannah, R. L., and S. E. Reed: "The Strain Gage Users' Handbook," Elsevier Applied Science, London and New York, 1992
- 6 Hoffmann K 2001 Applying the Wheatstone bridge circuit HBM Company Kyowa Electronic Instruments Co. Ltd., 2016 Introduction to Strain Gages
- 7 Макаров М.А. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. М., Машиностроение, 1975. 288 с.
- 8 ZETLAB - URL: <http://www.zetlab.com> (04.03.2021).

REFERENCES

- 1 Hoffman K., 1989, An Introduction to Measurements using Strain Gauges, HBM GmbH, Darmstadt.
- 2 S.F Richard and E.B. Donald, "Theory and Design for Mechanical Measurements," 5th ed. John Wiley & Sons, Inc. Chapter 11: pp. 466, 2011.
- 3 H. Karl, "An Introduction to Measurements using strain gauges," Germany: Druckerei Drach Press, Alsbach. Pp.1-32, 1987.
- 4 S.F Richard and E.B. Donald, "Theory and Design for Mechanical Measurements," 5th ed. John Wiley & Sons, Inc. Chapter 11: pp. 466, 2011.
- 5 Hannah, R. L., and S. E. Reed: "The Strain Gage Users' Handbook," Elsevier Applied Science, London and New York, 1992
- 6 Hoffmann K 2001 Applying the Wheatstone bridge circuit HBM Company Kyowa Electronic Instruments Co. Ltd., 2016 Introduction to Strain Gages
- 7 Makarov M.A. Tenzometriya v mashinostroenii. Spravochnoe posobie. M., Mashinostroenie, 1975. 288 s.
- 8 ZETLAB - URL: <http://www.zetlab.com> (04.03.2021).

А. Қ. ТӨЛЕШОВ, А. А. ДЖОМАРТОВ, А. Н. КАМАЛ, А. Е. АБДУРАИМОВ

*Ө.А.Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты,
Алматы, Қазақстан
e-mail: aman_58@mail.ru legsert@mail.ru, kan77705@gmail.com,
zizo_waterpolo@mail.ru*

МЕХАНИЗМДЕРДІ, МАШИНАЛАРДЫ ЖӘНЕ РОБОТТАРДЫ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ ҮШІН ТЕНЗОМЕТРИЯЛЫҚ ӨЛШЕУ ЖҮЙЕСІ

Жұмыста механизмдерді, машиналарды және роботтарды эксперименттік зерттеуге арналған тензометриялық өлшеу жүйесі көрсетілген. Тензометриялық өлшеу жүйесі CAN интерфейсі бар ZETSENSOR сериясының интеллектуалды цифрлық сенсорларының негізінде құрастырылған. Ақпаратты өңдеу алгоритмі және өлшенген сигналдарды визуализациялау ZETLAB SENSOR бағдарламалық құралының көмегімен жүзеге асырылады. Тензометриялық өлшеу жүйесі механизмдердің, машиналар мен роботтардың буындарындағы орын ауыстыру, күштер, деформациялар мен кернеулер сияқты параметрлерді анықтау үшін қолданылады. Іінді преста тәжірибелік зерттеу үшін тензометриялық өлшеу жүйесі қолданылды. Алынған тәжірибе нәтижелері оны динамикалық өлшеулер үшін қолданудың қарапайымдылығы мен ыңғайлылығын растады.

***Түйін сөздер:** тензометрді өлшеу жүйесі, сандық датчик, тензөлішегіш, кернеуі, күш, деформация, жүктеме.*

A. K. TULESHOV, A. A. JOMARTOV, A. N. KAMAL, A. E. ABDURAIMOV

*O.A.Joldasbekov, Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan
e-mail: aman_58@mail.ru legsert@mail.ru, kan77705@gmail.com,
zizo_waterpolo@mail.ru*

TENSOMETRIC MEASUREMENT SYSTEM FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF MECHANISMS, MACHINES AND ROBOTS

The paper shows a tensometric measurement system for the experimental research of mechanisms, machines and robots. The tensometric measuring system is built on the basis of intelligent digital sensors of the ZETSENSOR series with a CAN interface. The information processing algorithm and the visualization of the measured signals is carried out using the ZETLAB SENSOR software. The tensometric measurement system is used to determine such parameters as: displacement, forces, deformations and stresses in the links of mechanisms, machines and robots. A tensometric measurement system was used for the experimental study of the crank press. The obtained experimental results confirmed the simplicity and convenience of its use for dynamic measurements.

***Key words:** strain gauge measurement system, digital sensor, strain gauge, stress, force, strain, load,*