

УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ТЕНЗОМЕТРУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО ОБЛАДНАННЯ

В.І.Артим, П.М.Райтер, О.М.Мандрик, В.Р.Осадця

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727186;
e-mail: viarty@rambler.ru*

Безпека експлуатації в умовах триваючого фізичного зношування обладнання на небезпечних промислових об'єктах зумовлює підвищення значення методів і засобів їх діагностики. Особливо це стосується відповідального великогабаритного обладнання, аварії з яким можуть призвести до людських жертв, забруднення навколишнього середовища та великих економічних витрат. Проблема підвищення якості діагностування відповідального великогабаритного обладнання може бути вирішена шляхом комплексного використання сучасних засобів діагностики, в тому числі тензометричних станцій. Для реалізації мети розроблено пристрій, який призначений для синхронної реєстрації інформаційних сигналів від 20-ти тензорезисторів. Після закінчення циклу вимірювання результати реєстрації передаються в персональний комп'ютер через бездротовий Bluetooth інтерфейс. Інформаційними сигналами тензорезисторів є значення напруги, пропорційні деформаціям ділянок поверхні, на які наклеєні відповідні датчики. Також для оцінки швидкоплинних процесів динамічного навантаження розроблено і виготовлено АЦП для тензодатчиків з дискретністю сигналу 0,1 с. Розроблені пристрої пройшли апробацію в лабораторних умовах. Аналіз експериментальних результатів засвідчив працездатність удосконалених засобів тензометрування та можливість їх використання для оцінки напружено-деформованого стану відповідального великогабаритного обладнання.

Ключові слова: безпека, діагностика, напружено-деформований стан, тензорезистори.

Безопасность эксплуатации в условиях продолжающегося физического износа оборудования на опасных промышленных объектах обуславливает важность значения методов и средств их диагностики. Особенно это касается ответственного крупногабаритного оборудования, аварии на которых могут привести к человеческим жертвам, загрязнению окружающей среды и большим экономическим затратам. Проблема повышения качества диагностики ответственного крупногабаритного оборудования может быть решена с помощью комплексного использования современных средств диагностики, в том числе тензометрических станций. Для реализации цели разработано устройство, предназначенное для синхронной регистрации информационных сигналов от 20-ти тензорезисторов. После окончания цикла измерения результаты регистрации передаются в персональный компьютер через беспроводную Bluetooth интерфейс. Информационными сигналами тензорезисторов являются значения напряжения, пропорциональные деформациям участков поверхности, на которые наклеены соответствующие датчики. Также для оценки скоростных процессов динамической нагрузки разработан и изготовлен АЦП для тензодатчиков с дискретностью сигнала 0,1 с. Разработанные устройства прошли апробацию в лабораторных условиях. Анализ экспериментальных результатов показал работоспособность усовершенствованных средств тензометрирования и возможность их использования для оценки напряженно-деформированного состояния ответственного крупногабаритного оборудования.

Ключевые слова: безопасность, диагностика, напряженно-деформированное состояние, тензорезисторы.

Equipment operation safety at dangerous industrial facilities under continuous wear determines the importance of methods and means of their troubleshooting. It especially makes sense responsible concerns large-scale equipment, emergency with which can cause loss of life, environmental damage and great economic expenditure. The problem quality improvement of responsible large-scale equipment troubleshooting can be solved by implementation of modern troubleshooting techniques, including strain-gauge stations. For this purpose we have developed a device designed for synchronous registration of information signals from 20 strain gauges and for transmission of the achieved registration results to a personal computer by means of wireless Bluetooth interface in the end of a measuring cycle. The strain gauge information signals are the value of stress proportional to strain of the surface areas on which the proper gauges are stuck.

For high-velocity dynamic stress estimation we have designed and produced ADC for a strain gauge sensor with the signal discreteness of 0.1 sec.

The above mentioned devices have been tested in laboratories. The analysis of experimental results have showed the reliability of the improved strain-measuring devices and the opportunity of their usage for estimation of stress-strain level of responsible large-scale equipment.

Key words: safety, troubleshooting, stress-strain level, strain gauge.

Вступ

Безпека експлуатації в умовах триваючого фізичного зношування обладнання на небезпечних промислових об'єктах зумовлює підвищення значення методів і засобів їх діагности-

ки. Особливо це стосується відповідального великогабаритного обладнання, аварії з яким можуть призвести до людських жертв, забруднення навколишнього середовища та великих економічних витрат. У зв'язку з цим дуже важливим завданням є визначення науково обгрун-

тованими методами технічного стану і можливості безпечної експлуатації відповідального обладнання, особливо за межами нормативного терміну експлуатації.

Сучасне визначення технічної діагностики як галузі науково-технічних знань, суттю якої є теорія, методи і засоби пошуку і визначення дефектів технічних об'єктів, охоплює методи і засоби неруйнівного контролю. Неруйнівний контроль є засобом експертизи безпеки експлуатації, тому достовірність оцінки технічного стану обладнання багато в чому визначається засобами неруйнівного контролю.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу обладнання на сьогодні здійснюються на основі розрахунку напружено-деформованого стану з використанням результатів досліджень неруйнівними методами контролю. Питаннями діагностування технічного стану і прогнозування ресурсу обладнання присвячено праці Біргера І.О., Болотіна В.В., Колмогорова В.Л., Махутова М.О., Морозова Є.М., Почтенного Є.К. та ін.

Виділення невирішених частин

Незважаючи на досить широкий спектр засобів неруйнівного контролю і систем діагностики, що випускається сучасною промисловістю, великої кількості розроблених методів прогнозування ресурсу, проблема об'єктивної і надійної оцінки технічного стану і прогнозування ресурсу небезпечних об'єктів виробництва на сьогоднішній час не вирішена. Для виконання розрахунків необхідною умовою є точне знання усіх режимів експлуатації або поточної діаграми навантаження. Здійснення стандартних механічних випробувань на діючому обладнанні є неможливим, тому розрахунок напружено-деформованого стану для оцінки довговічності чи залишкового ресурсу здійснюється за допомогою даних про властивості матеріалу в стані поставки, що не забезпечує необхідну точність. Суттєвим недоліком сучасних методологій з оцінки залишкового ресурсу обладнання є відсутність об'єктивних діагностичних параметрів і приладів контролю, які б дали змогу вчасно визначати зони з граничним станом металу. Для визначення ділянок обладнання, які найбільше підлягають впливу пошкоджень, необхідним є знання фактичного напружено-деформованого стану. Для вирішення цієї проблеми може бути використано тензометричний метод дослідження. Він дає змогу визначати НДС ділянок обладнання за визначеними зв'язками навантаження-деформація, а потім, використовуючи розрахункові засоби механіки руйнування, здійснити прогнозування ресурсу обладнання.

Формування цілі

Першим і дуже відповідальним етапом є визначення усіх конструктивних параметрів

модуля, що і є метою даної роботи. Проблема підвищення якості діагностування великогабаритного обладнання може бути вирішена за допомогою комплексного використання сучасних засобів діагностики, в тому числі тензометричних станцій.

Метою даної роботи є удосконалення засобів тензометрування для підвищення безпеки експлуатації відповідального великогабаритного обладнання.

Виклад основного матеріалу

Для реалізації мети розроблено пристрій для синхронної реєстрації інформаційних сигналів від двадцяти тензорезисторів та, після закінчення циклу вимірювання, передачі результатів реєстрації в персональний комп'ютер через бездротовий Bluetooth інтерфейс. Інформаційними сигналами тензорезисторів є значення напруги, пропорційні деформаціям ділянок поверхні, на які наклеєні вказані давачі.

Кожен із двадцяти тензосенсорів з номінальним електричним опором 200 Ом підключений за схемою повного тензорезистивного моста. З метою мінімізації впливу технологічного розкиду номінального значення опору кожного з тензорезисторів на результати вимірювання деформації та значення початкового зміщення (offset output) на виході мостової схеми для кожного з двадцяти тензорезисторів реалізовано окрему мостову схему з індивідуально підібраними за результатами тестування тензорезисторами. Високоточне значення опорної напруги живлення тензомоста на рівні 1,8 В формується інтегральною схемою прецизійного джерела опорної напруги та подається в одне з плечей тензомоста. Значення напруги розбалансу в другому плечі тензомоста, що пропорційне деформації, вимірюється за допомогою спеціалізованої чотириканальної інтегральної схеми дельта-сигма аналого-цифрового перетворювача ADS1234IPW. Період між повторними операціями зчитування інформації з серії двадцяти тензосенсорів та його АЦП перетворення складає 1 с, роздільна здатність кожного каналу аналого-цифрового перетворювача - 224. Розроблене системне програмне забезпечення мікропроцесорного керування та схемна реалізація включення АЦП перетворювача забезпечує вимірювання напруги на виході тензомоста з точністю 10 мкВ у діапазоні $\pm 0,9$ В, тобто забезпечується реалізація реального двополярного 18-ти бітного АЦП перетворення інформаційного сигналу сенсора деформації, а основна приведена похибка складає 0,001% від верхньої границі вимірювання. Вказане підтверджують результати тестування одного з двадцяти каналів (рис. 1). Тестування виконувались шляхом реєстрації протягом 30 с сигналу з тензомоста за крокової зміни (0,5 кг) навантаження на консольно закріплену металеву балку, на поверхню якої попередньо було наклеєно один з тензорезисторів мостової схеми.

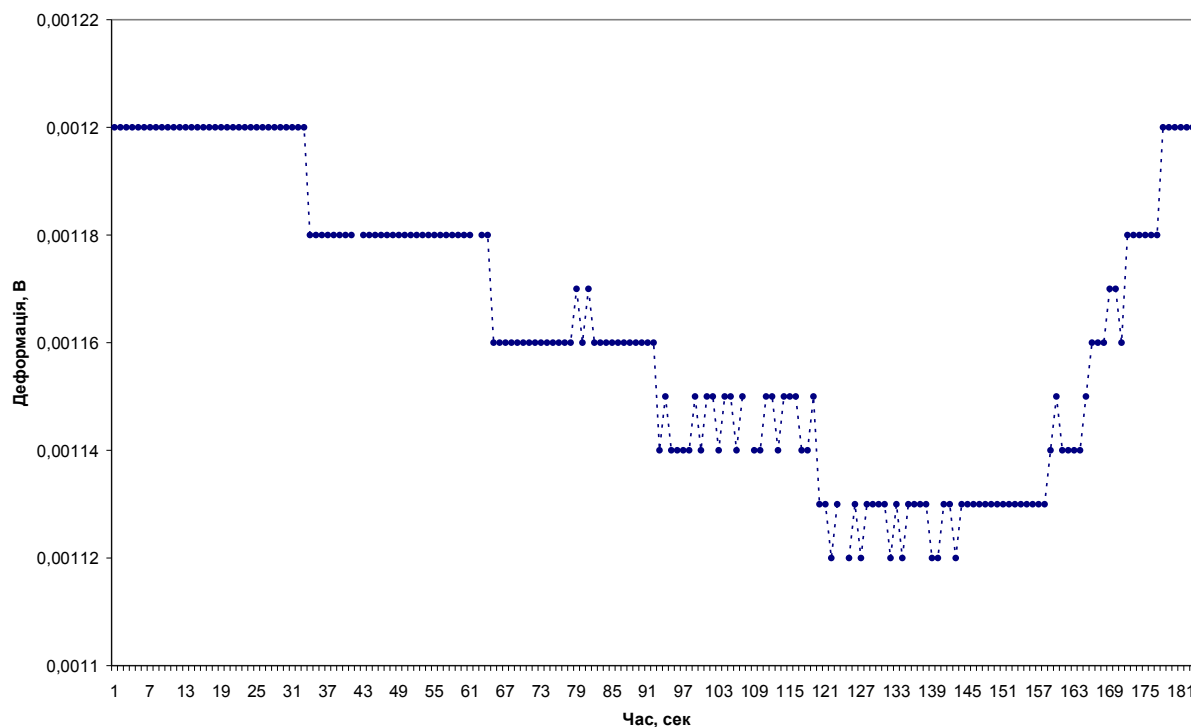


Рисунок 1 – Результати випробувального тестування пристрою АЦП

Викиди на окремих рівнях сигналу на виході тензомоста (рис. 1), зареєстровані розробленою вимірювальною системою, зумовлені перехідними процесами та вібрацією балки після прикладення навантаження і затухають за умови збільшення періоду реєстрації. Результати тестування інформаційно-вимірювальної системи свідчать про чутливість приладу на рівні $10\text{мкВ}/0,25\text{ кг}$ навантаження. Тоді максимальне значення навантаження за умови відсутності руйнування тензорезистора і роботи його в лінійному діапазоні складатиме 22,5 тис. кг.

Одна з переваг розробленого пристрою полягає в тому, що напруга живлення в плече живлення кожного з тензорезисторних мостів подається лише впродовж часу вимірювання на ньому, тобто приблизно 40 мс, через період 1 с. Це зводить до мінімуму складову величину невизначеності вимірювань, що зумовлена зміною сигналу на виході тензомоста через нагрівання тензорезисторів мостів струмом у моменти часу, коли вони не здійснюють вимірювання. Додатковою перевагою запропонованої конструкції вимірювального пристрою є виключення проміжного підсилення напруги сигналу на виході тензомоста у вимірювальному ланцюгу між мостом та АЦП, що суттєво знижує похибку вимірювання таких пристроїв.

Значення сигналу напруги розбалансу тензомоста, зумовлене деформацією тензосенсора, після АЦП перетворення зчитується по SPI інтерфейсу мікропроцесором PIC18F46K20, який за цим же інтерфейсом заносить його на зберігання у спеціалізовану мікросхему електроперепрограмованої пам'яті M25P64. Крім керування процесом вимірювання мікропроцесор також виконує функції опитування кнопки ке-

рування роботою пристрою (пуск сеансу Bluetooth зв'язку), керування роботою модуля Bluetooth, керування роботою модуля АЦП перетворення та керування подачею живлення лише на той тензоміст, за допомогою якого у даний момент виконується вимірювання.

З метою мінімізації похибок вимірювання, зумовлених нестабільністю напруги живлення пристрою і реалізації його автономного режиму роботи, живлення пристрою реалізовано від блоку нікель-метал-гідридних акумуляторів. Для подовження режиму роботи пристрою без перезарядження акумуляторів за допомогою вказаного мікропроцесора реалізований програмно режим "засинання" модулів пристрою вимірювання, які не задіяні у кожен визначений момент в процесі вимірювання чи передачі інформації.

Керування роботою пристрою та процесами вимірювання, накопичення та зчитування результатів вимірювання здійснюється дистанційно через Bluetooth інтерфейс між персональним комп'ютером та пристроєм вимірювання. Для цього застосовується спеціально розроблене програмне забезпечення. Синхронізація процесів вимірювання здійснюється за допомогою лічильника реального часу. Результати вимірювання пристрою, отримані через Bluetooth інтерфейс, програмно зберігаються у вигляді текстового файлу з двадцятьма стовпцями значень напруги (по кожному вимірювальному каналу) та відповідними значеннями моментів часу вимірювання.

Прострий апробовано на скомплектованому на базі кафедри зварювання «Львівської політехніки» в міжгалузевій науково-дослідній лабораторії діагностики напруженого стану



Рисунок 2 – Дослідно-вимірювальний комплекс для експериментального визначення характеристик напружено-деформованого стану в зоні основного металу і кільцевих зварних з'єднань труб МТ



Рисунок 3 – Комплектуючі апаратури для проведення вимірювань

експериментальному устаткуванню, яке дає можливість в лабораторних умовах якісно моделювати напружений стан (НС) у зоні зварних багат шарових з'єднань трубопроводів (рис. 2-4) [1-4].

Стенди виготовлені у вигляді горизонтальних резервуарів (рис. 2-4) із обичайок труб із зовнішнім діаметром 1020 мм, зварених між

собою багат шаровими кільцевими швами і приварених на торцях на півсферичних днищах. Геометричні розміри котушок наведені в таблиці 1, а основні механічні характеристики їх матеріалів згідно сертифікатів – в таблиці 2. Режими зварювання неповоротних стиків котушок резервуара вимірювальних стендів вказані в таблиці 3. Перевірка якості зварних



Рисунок 4 – Насосна станція дослідницького стенду

Таблиця 1 – Геометричні характеристики і марки сталі котушок

№ котушки	Зовнішній діаметр, мм	Довжина котушки, мм	Товщина стінки, мм	Форма	Марка сталі
1	1020	250	22	напівсферичне днище	09Г2С
2	1020	450	14	циліндрична котушка	17Г1СУ
3	1020	800	10	циліндрична котушка	13Г1С
4	1020	450	10	циліндрична котушка	17Г1С
5	1020	400	10	циліндрична котушка	17Г1С
6	1020	400	9,5	циліндрична котушка	13Г1СУ
7	1020	850	14	циліндрична котушка	17Г1С
8	1020	250	22	напівсферичне днище	09Г2С

Таблиця 2 – Основні механічні характеристики матеріалу циліндричних котушок

№ котушки	Марка сталі	Границя міцності σ_b , МПа	Границя плинності σ_T , МПа	Відносне видовження ϵ , %	Ударна в'язкість основного металу КСV, Дж/см ²
1; 8	09Г2С	510	355	22	29,4 (-70°C)
2; 6	17Г1СУ	520	370	21,0	40 (-40°C)
3	13Г1С	605	420	16,0	39 (-40°C)
4; 5	17Г1С	560	390	25,0	24,8 (-40°C)
7	13Г1СУ	584	434	37,0	14,0 (-60°C)

Таблиця 3 – Режими зварювання під час виконання неповоротних стиків котушок резервуара вимірювального стенду

Проходи зварного шва	Зварювальний струм Изв, А	Напруга на дузі Уд, В	Діаметр електроду Дел, мм	Марка електроду УОНИ-13/55
Перший прохід (кореневий шов)	100	22	3	
Другий прохід (заповнюючий шов)	150	20	4	
Третій прохід (облицювальний шов)	150	20	4	

з'єднань проводилась фізичними методами контролю за допомогою рентгеноскопії і ультразвукової дефектоскопії.

Резервуари дослідних стендів заповнено водою, і за допомогою насосної станції (рис. 4) в ньому створюється внутрішній тиск заданого рівня. Надлишковий тиск створювали за допомогою об'ємного насосного агрегату МП-150. Тиск у резервуарі контролювали зразковим манометром МО з класом точності 0,4 (рис. 2). Зменшення тиску в резервуарі досягається за допомогою зворотного переливання води у накопичувальний бачок (рис. 4). Насосна станція дозволяє створювати внутрішній тиск у резервуарі до 15 МПа. При виготовленні резервуара використовували труби тривалого терміну експлуатації з різних марок поширених трубних сталей.

Основні механічні характеристики згідно сертифікатів на виготовлення труб зведені до таблиці 2.

Комплект устаткування для визначення напружено-деформованого стану в металі дослідних резервуарів з використанням тензодатчиків показано на рис. 2 і 3. Вимірювальний тракт складається з тензодатчиків, комутуючих колодок, екранованих з'єднувальних кабелів, спроектованої та виготовленої двадцятиканальної тензостанції з блоком живлення та ноутбука з відповідним програмним забезпеченням.

Умови експлуатації апаратури і тензодатчиків: температура навколишнього повітря – від -10°C до $+40^{\circ}\text{C}$; відносна вологість повітря – від 30% до 80%. Для компенсації температурних змін встановлено компенсаційний тензодатчик (рис. 3).

Напружений стан дослідного резервуару за допомогою тензорезисторів визначали у такій послідовності: 1) вибір типу тензорезисторів і перевірка його працездатності, 2) розмітка місця наклеювання та підготовка поверхні (очищення і знежирення), 3) наклеювання тензодатчиків з використанням клею БФ-2 чи "Ціакрин" та перевірка якості приклеювання, 4) захист тензорезисторів від потраплення вологи і тарування вимірювального тракту. Використовували фольгові тензорезистори типу 2ПКБ-20 з базами від 10 до 40 мм, виготовлені згідно з ТУЗ.06 України 7710-0001-93 із такими технічними параметрами: номінальний електричний опір $R_d = 200 \text{ Ом}$; середнє значення чутливості $k = 2,14$; середнє квадратичне відхилення чутливості $S_n = 0,003$; середнє значення часової повзучості при нормальних умовах роботи $\Pi = 0,09 \%$; робочий струм I не більше 30 мА. Перед початком кожної серії вимірювань проводили балансування резисторів за допомогою грубого та тонкого регулювання мостів тензостанції.

На різних відстанях, більших 300 мм від зварних швів резервуара, наклеювались тензорезистори. Відтак за допомогою насосної станції (рис. 4) в резервуарах створювався внутрішній тиск різного рівня. Для кожного з цих рівнів за допомогою тензорезисторів вимірювались колові та осьові напруження.

Експериментальне визначення напружень проводилося за внутрішнього тиску у резервуарі дослідної установки $p = 5 \text{ МПа}$ і $5,5 \text{ МПа}$. В усіх дослідженнях кількість повторних вимірювань складала 8. Результати експериментальних вимірювань напружень подано на рисунку 5, а оброблені результати – на рисунку 6.

За отриманими значеннями напружень можна визначити характеристики напружено-деформованого стану в зоні основного металу і кільцевих зварних з'єднань труб магістральних газопроводів. [5].

Для оцінки швидкоплинних процесів динамічного навантаження розроблено і виготовлено АЦП для тензорезисторів з дискретністю сигналу 0,1 с. Результати їх тарування наведено на рис. 7.

Апробацію АЦП також проведено на лабораторній буровій установці, яка є прототипом бурової установки "Уралмаш-4Е". На рис. 8 зображено схему лабораторної бурової установки, що складається із: електродвигуна 1, клинопасової передачі 2, коробки швидкостей 3, карданного вала 4, одновальної одnobарабанна лебідки 5, стрічкового гальма 6. Талева система складається із кронблоку 7, гаюблока 8, талевого каната 9, ведуча вітка якого навивається на барабан лебідки, а нерухома з'єднана з механізмом кріплення каната 10. В установці використана модель вежі баштового типу. Висота вежі $H=3,9 \text{ м}$. Для моделювання роботи шинно-пневматичної муфти клинопасова передача обладнана притисним роликком, за допомогою якого можна за необхідності добиватися проколювання пасів.

Технічна характеристика лабораторної установки показана в таблиці 4.

Відповідно до задач досліджень здійснювались операції підймання контрольних вантажів на різних швидкостях.

На рис. 9 наведено результати досліджень навантаженості за різних вантажів та пружин, які призначені для моделювання зміни місця розміщення тензорезисторів по довжині колоди.

Висновок

Таким чином, розроблені пристрої пройшли апробацію в лабораторних умовах. Аналіз експериментальних результатів засвідчив працездатність удосконалених засобів тензометрування та можливість їх використання для оцінки НДС відповідального великогабаритного обладнання.

Спроековано, виготовлено та проведено апробації нового двадцятиканального пристрою АЦП для визначення напружено-деформованого стану великогабаритного обладнання, в першу чергу, трубопроводів великих діаметрів.

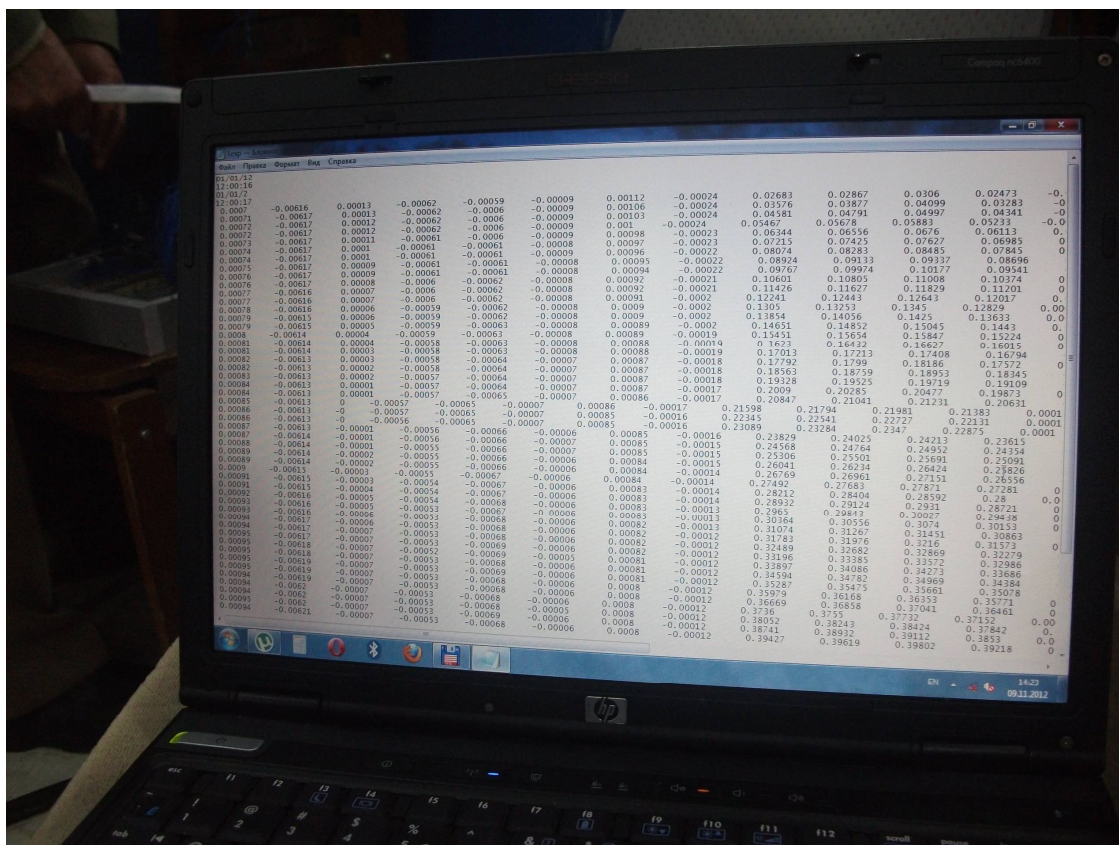


Рисунок 5 – Результати експериментальних вимірювань напружень на ПК

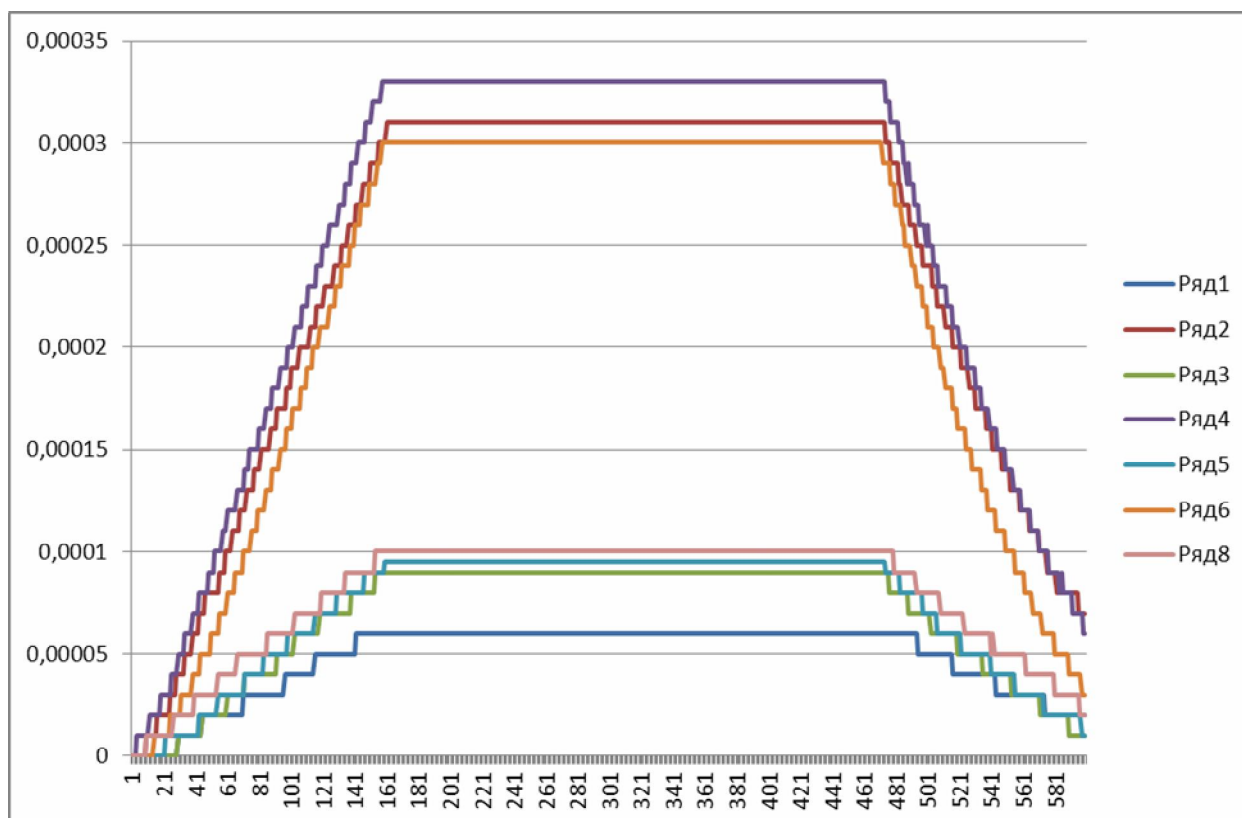


Рисунок 6 – Результати експериментальних вимірювань напружень

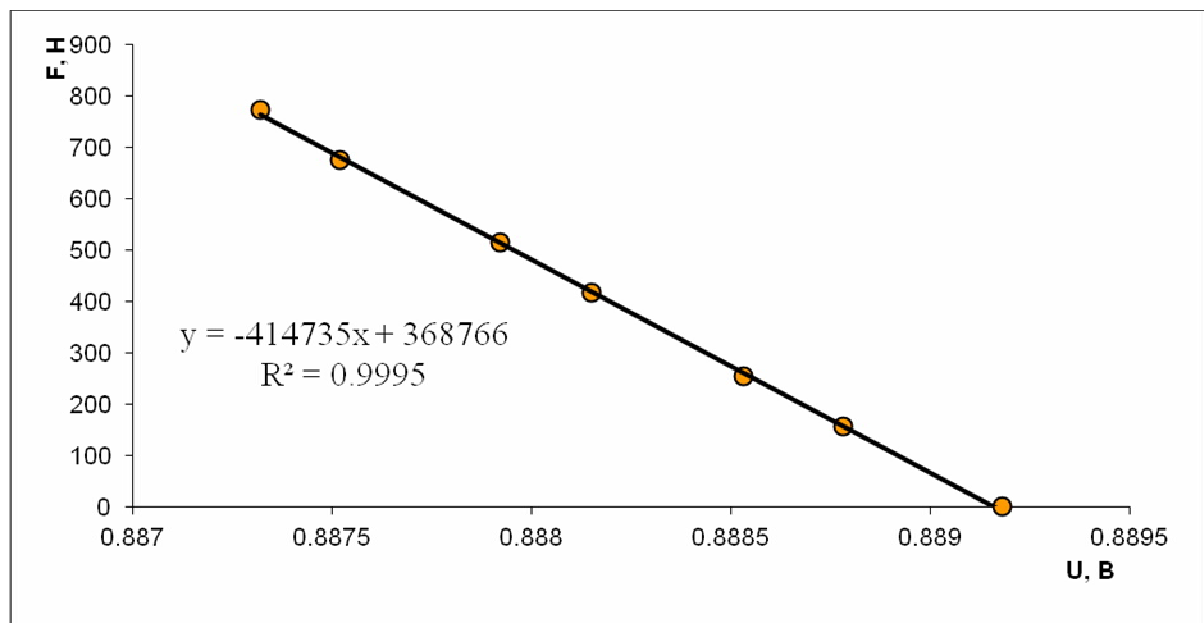
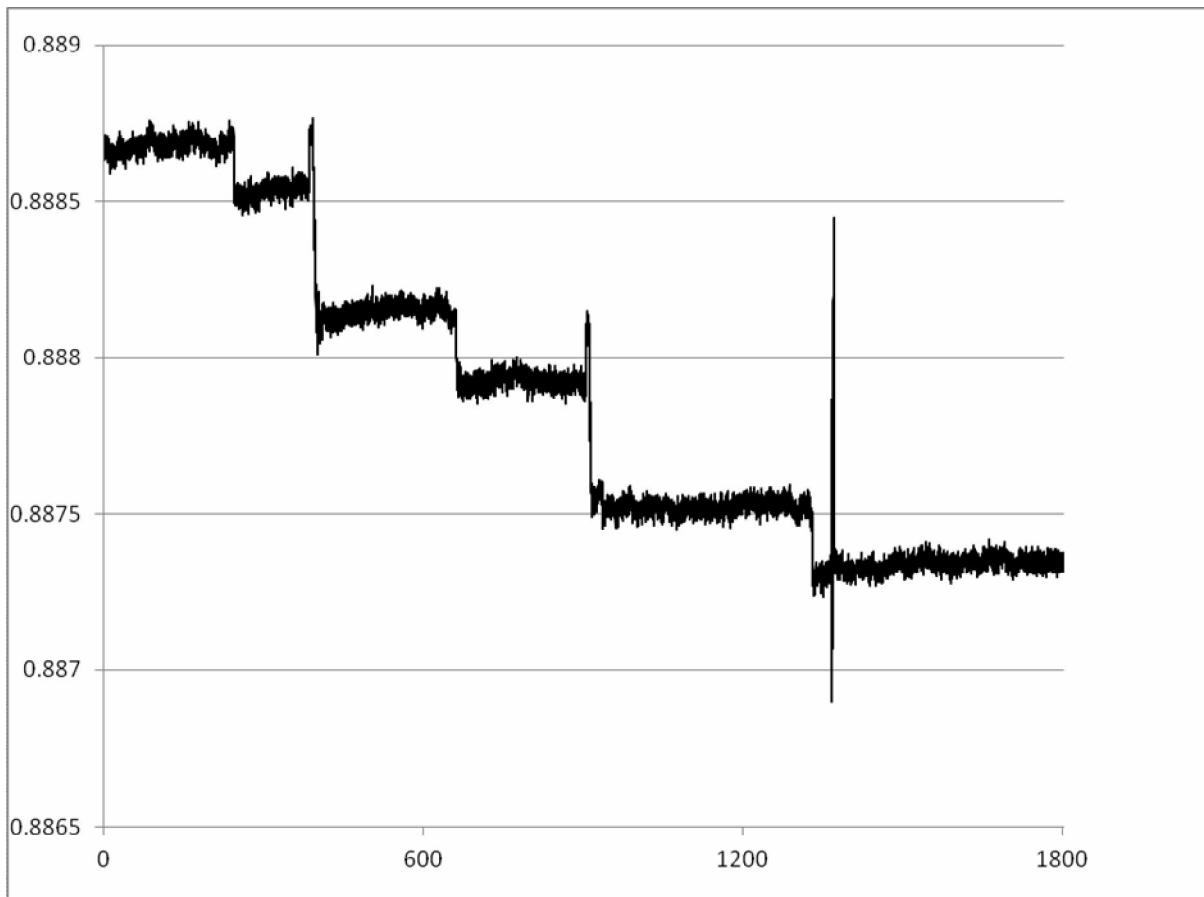


Рисунок 7 – Результати тарування пристрою АЦП

Таблиця 4 – Технічна характеристика лабораторної установки

Номер передачі	1	2	3	4	5	6
Швидкість піднімання, м/с	0,069	0,09	0,11	0,193	0,255	0,331

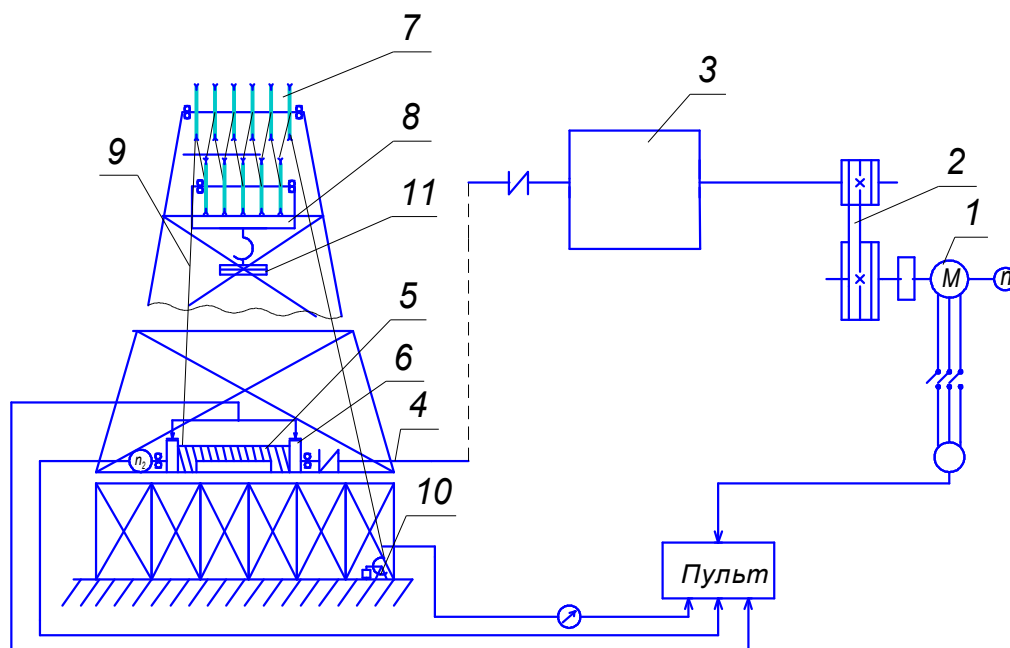


Рисунок 8 – Схема лабораторної бурової установки

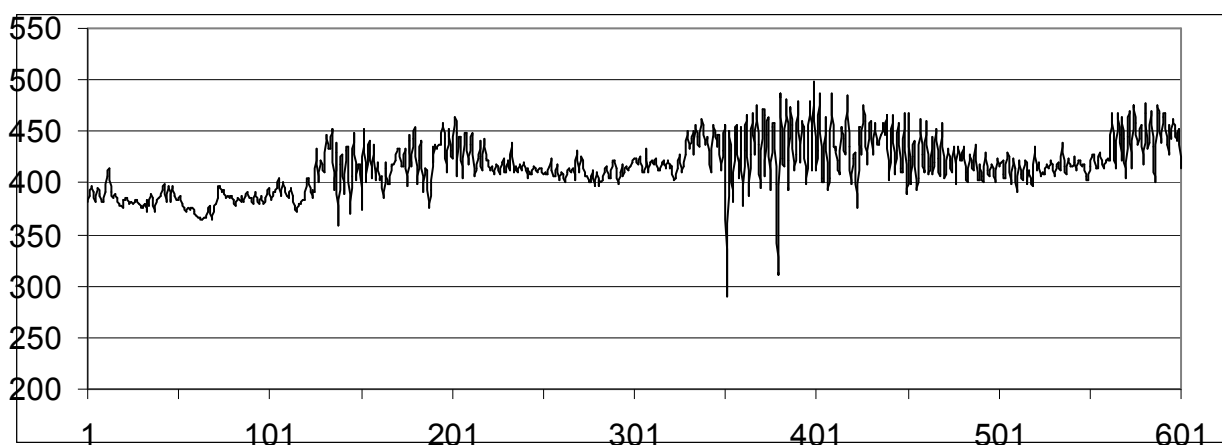


Рисунок 9 – Результати досліджень навантаженості

Література

1 Банахевич Ю.В. Дослідно-вимірвальний комплекс для експериментального визначення характеристик напружено-деформованого стану в зоні кільцевих зварних з'єднань труб магистральних газопроводів / Ю.В. Банахевич // Матеріали 5-ої міжнародної науково-технічної конференції і виставки [«Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання»], (м. Івано-Франківськ, 2-5 грудня 2008 р.). – Івано-Франківськ, 2008. – С. 130 – 133.

2 Аналіз і оцінювання працездатності та тріщиностійкості зварних трубопроводів / В.Д. Макаренко, В.Ю. Чернов, Є.І. Крижанівський, М.М. Прохоров // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 4. – С. 47 – 50.

3 Банахевич Ю.В. Визначення напружено-деформованого стану зварних з'єднань труб

методом спекл-інтерферометрії / Ю.В. Банахевич // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – № 23. – С. 29-34.

4 Діагностування напруженого стану магистральних газопроводів в околі стикових зварних з'єднань розрахунково-експериментальним методом / В.А. Осадчук, А.В. Драгілев, Ю.В. Банахевич, В. Пороховський // Матеріали 3-ої міжнародної конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій», (м. Львів, 2004). – Львів, 2004. – С. 439–444.

5 Мазур І.І. Безопасність трубопроводних систем / І.І. Мазур, О.М. Іванцов. – М.: Издательство Центр «ЕЛИМА», 2004. – 1096 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
17.12.12
Рекомендована до друку професором
В. М. Івасівим