

ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 622.673.1

DOI: 10.31471/1993-9981-2020-1(44)-46-53

ДОСВІД РОЗРАХУНКУ, РОЗРОБКИ І ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕНЗОДАВАЧА

В. В. Лопатін

*Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук
України; 49005, м Дніпро, вул. Сімферопольська 2а, тел. (0562) 46-01-51, факс (0562) 46-
24-26; e-mail: nanu@igtm.dp.ua*

У гірничій галузі часто виникає необхідність в безпосередньому вимірюванні зусиль з істотними обмеженнями до давачів, тому використання номенклатури існуючих давачів неможливо. Крім того давач зусилля і навантаження, який призначений для експлуатації у важких гірських умовах повинен володіти: з розширеним діапазоном робочих температур, ступенем захисту IP67, вологостійкістю в агресивному середовищі і конструктивно виконаний так, щоб не порушувати вимоги безпеки в гірських виробках. Дослідженнями були визначені функціональні обмеження давача зусиль для гірничої виробки - максимальна деформація, мінімальні габаритні розміри і максимальні напруги. Визначальними при виборі конструкції давача були точна фіксація, надійність, адаптивність до гірських технологічних процесів із забезпеченням безпеки і відповідності умовам експлуатації, і прийнятна вартість. За вимогами, галузевих стандартів України (СОУ) були обрані геометричні розміри давача з метою знаходження оптимального рішення. На основі цієї інформації за допомогою багатопараметричного підходу отримано безліч Парето-допустимих рішень. На безлічі паретооптимальних рішень був обраний варіант давача, для якого після застосування вищевикладеного підходу вдалося знизити нелінійність і зменшити площу між кривими прямого і зворотного ходу, а також отримати близьку до знайденого значенням деформацію в зоні наклепки. На основі дослідної партії виготовлених давачів було виконано їх доведення в умовах реальної гірничої виробки. Розроблений датчик типу 4201 ДСТ-10 відповідає умовам безпеки ПБ ТБ в гірничій виробці і забезпечує більш високу метрологічну точність, ніж аналогічні давачі, розроблені іншими авторами. У 4201 ДСТ-10 використані методи багатокритеріальної оптимізації при проектуванні пружних елементів датчика зусиль на навантаження 10 тонн. Допускається можливість його застосування в аналогічних жорстких умовах експлуатації на інших об'єктах.

Ключові слова: гірнича виробка, тензорезисторний давач, гістерезис, пружний елемент, багатокритеріальна оптимізація, безліч Парето, нелінійне деформування.

В горной отрасли часто возникает необходимость непосредственного измерения усилий с существенными ограничениями к датчикам, поэтому использование номенклатуры существующих датчиков невозможно. Кроме того, датчик усилия и нагрузки, который предназначен для эксплуатации в тяжелых горных условиях, должен обладать: с расширенным диапазоном рабочих температур, степенью защиты IP67, влагостойкостью в агрессивной среде и конструктивно не нарушать требования безопасности в горных выработках. Исследованиями были определены функциональные ограничения датчика усилий для горной выработки - максимальная деформация, габаритные размеры и максимальные напряжения. Определяющими при выборе конструкции датчика были точная фиксация, надежность, адаптивность к горным технологическим процессам с обеспечением безопасности и соответствия условиям эксплуатации, и приемлемая стоимость. По требованиям, отраслевых стандартов Украины (СОУ) были выбраны геометрические размеры датчика с целью нахождения оптимального решения. На основе этой информации с помощью многопараметрического подхода получено множество Парето допустимых решений. На основе множества паретооптимальных решений был выбран вариант датчика, для которого после применения вышеизложенного подхода удалось снизить нелинейность и уменьшить площадь между кривыми прямого и обратного хода, а также получить близкую к найденному значению деформации в зоне наклепки. На основе

опытной партии изготовленных датчиков была выполнена их доводка в условиях реальной горной выработки. Разработанный датчик типа 4201 ДСТ-10 отвечает условиям безопасности ПБ ТБ в горной выработке и обеспечивает более высокую метрологическую точность, чем аналогичные датчики, разработанные другими авторами. В 4201 ДСТ-10 использованы методы многокритериальной оптимизации при проектировании упругих элементов датчика усилий на нагрузку 10 тонн. Допускается возможность его применения в аналогичных жестких условиях эксплуатации на других объектах.

Ключевые слова: горная выработка, тензорезисторный датчик, гистерезис, упругий элемент, многокритериальная оптимизация, множество Парето, нелинейное деформирование.

In the mining industry, it is often necessary to directly measure forces with significant restrictions on the sensors, so the use of the range of existing sensors is not possible. In addition, the force and load sensor, which is designed for operation in severe mountain conditions, must be: with an extended range of operating temperatures, degree of protection IP67, moisture resistant in an aggressive environment and structurally designed so as not to violate safety requirements in mine workings. Studies have identified the functional limitations of the force sensor for mining - maximum deformation, overall dimensions and maximum stresses. The decisive factors in choosing a sensor design were precise fixation, reliability, adaptability to mining technological processes with safety and compliance with operating conditions, and reasonable cost. According to the requirements of industry standards of Ukraine, the geometric dimensions of the sensor were chosen in order to find the optimal solution. Based on this information, using a multi-parameter approach, many Pareto valid solutions are obtained. Based on many Pareto optimal solutions, a sensor variant was chosen for which, after applying the above approach, it was possible to reduce non-linearity and reduce the area between the forward and backward curves, as well as to get close to the found strain value in the sticker area. On the basis of an experimental batch of manufactured sensors, their refinement was performed in real mining. The developed sensor type 4201 DST-10 meets the safety requirements of the safety control system in mining and provides higher metrological accuracy than similar sensors developed by other authors. In 4201 DST-10, multicriteria optimization methods were used in designing the elastic elements of the force sensor for a load of 10 tons. The possibility of its use in similar harsh operating conditions at other facilities is allowed.

Keywords: mining, strain gauge sensor, hysteresis, elastic element, multicriteria optimization, Pareto set, nonlinear deformation.

Формулювання проблеми

У гірничій виробці часто виникає необхідність безпосереднього вимірювання зусиль з істотними обмеженнями що до давача, тому використання номенклатури існуючих давачів не можливе. Для відмірювання зусиль необхідний електричний перетворювач – давач. В даний час домінують тензорезисторні давачі зусиль з фольговими тензорезисторами, які наклеюються і сприймають деформацію пружного елемента в місці наклейки.

Його переваги:

- взаємозамінність;
- зручний діапазон виміру, який визначається середнім рівнем напруги пружинних сталей в діапазоні $0 \div 3.0 \times 10^8$ Па, при якому гарантовані лінійно-пружні властивості;
- великий вибір різноманітності пружних елементів дозволяє знайти раціональний елемент для розв'язуваної задачі.

Як відомо, тензометричний давач - наукомісткий виріб, створення якого проблематичним без раціонального вибору

конструкції пружного елемента, ревнового проведеного розрахунку і вивіреного науково-обґрунтованого доведення. Найвідповідальнішою ланкою тензометричного давача є пружний елемент. З точки зору автора, основні проблеми давача пов'язані з забезпеченням метрологічних характеристик стосовно залежності між деформацією пружного елемента і величиною навантаження. В ході виконаного дослідження було виявлено, що відмінність робочої характеристики давача від лінійної виникає з причини, пов'язаної зі зміною форми пружного елемента в процесі деформування, що оцінюється за формулою $\epsilon = \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_{max}} \times 100\%$, а також пов'язана з температурною похибкою робочого коефіцієнту передачі, неспівпадання характеристики при навантаженні - «петлі гистерезису».

Гістерезис буває двох видів: фізичний - через недосконалість пружних властивостей матеріалу виготовлення і конструктивний, що виникає внаслідок наявності тертя і розсіювання енергії між частинами конструкції пружного

елементу. Величина гістерезису оцінюється різницею показань при прямому і зворотному ході.

Як відомо, тензометричні давачі - основний первинний пристрій перетворення фізичної величини в нормований електричний сигнал. У нашому випадку це давач зусилля і навантаження, який призначений для експлуатації у важких гірничих умовах: з розширеним діапазоном робочих температур, ступенем захисту IP67, вологостійкий в агресивному середовищі і конструктивно виконаний так щоб не порушувати вимоги безпеки в гірничих виробках. Визначальними при виборі конструкції датчика були точна фіксація, надійність, адаптивність до гірничих технологічних процесів з забезпеченням безпеки і відповідності умовам експлуатації, та прийнятна вартість.

Виклад основного матеріалу і результати дослідження.

Були визначені функціональні обмеження давача зусиль для гірничої виробки - це параметри, які служать обмеженнями при створенні давачі. До них належать: максимальна деформація, габаритні розміри та максимальні напруги. Варіювачі обмеженими параметрами, ми отримали безліч допустимих рішень, які відповідають всім зазначеним обмеженням. За вимогами, галузевих стандартів України (СОУ) були обрані геометричні розміри давача з метою знаходження оптимального рішення. На основі цієї інформації за допомогою багатопараметричного підходу було сформульоване остаточне рішення. Багатопараметричний підхід полягав у отриманні множені Парето допустимих рішень [1-4], і на основі аналізу, за допомогою експертної думки визначено найкращого результату. Тому, що, як відомо множену Парето можна визначити як множену, в якій значення будь-якого з критеріїв якості можна поліпшити тільки за рахунок погіршення інших критеріїв якості - будь-яке з рішень, яке належить множені Парето, не може бути покращено одночасно по всім приватним критеріям. На основі множені паретооптимальних рішень був обраний варіант датчика, для якого після застосування вищевикладеного підходу вдалося знизити нелінійність і зменшити площу між кривими

прямого і зворотного ходу, а також отримати близьке до знайденого значення деформації в зоні наклепки.

Автором спільно з представником підприємства "Метриком" Є.С. Сідаш були розроблені технічні умови на тензометричний давач для роботи в гірничій виробці.

Технічні умови давача

- верхня межа вимірювання 100 кН;
- перевантажувальна здатність допустима по метрології 120;
- допустима по міцності 200;
- коефіцієнт передачі не менше мВ/В $0,8 \pm 2\%$;
- чутливість Н 200;
- похибка 0,2%;
- компенсований діапазон температур $^{\circ}\text{C}$ від +10 до +50;
- робочий діапазон температур $^{\circ}\text{C}$ від - 20 до +70;
- електричний опір, Ом:
 - вхідний 380 ± 2 ;
 - вихідний 400 ± 4 ;
- максимальна допустима напруга
- живлення, В 12;
- довжина кабелю давача, м 0,5;
- габаритні розміри в зборці, мм:
 - діаметр до 90;
 - висота до 22.

Обраний мембранний пружний елемент давача є деталь, що виготовляється з цільного шматка металу з наступною механічною обробкою для формування контуру перетину, що забезпечує потрібний напружено-деформований стан пружного елемента (рис. 7). З теорії відомо, що в центрі рівномірно навантаженої мембрани радіальні і тангенціальні напруги рівні за величиною. У міру віддалення від центру мембрани напруги зменшуються, доходячи до нуля, а потім, змінивши знак, збільшуються до максимуму. Виходячи з цього, ми наклеювали тензорезистори по краю мембрани, орієнтуючи в радіальному, а не тангенціальному напрямку. Орієнтовно характеристика перетворення давача може бути визначена з формули, наведеної в роботах [5-9]:

$$f = \frac{(3 - \mu)^2 \cdot p \cdot D^4}{E \cdot h^2},$$

де p - вимірюваний тиск; D - діаметр мембрани; h - товщина мембрани; μ - коефіцієнт Пуассона; E - модуль пружності матеріалу мембрани.

Для виготовлення мембрани нами дослідним шляхом використовувалися різні сплави з границею текучості понад 900 МПа.

В результаті спільної роботи з "Метриком" був створений давач типу 4201 ДСТ-10 [10]. Цей давач відповідає умовам безпеки ПБ ТБ в гірничій виробці та забезпечує вищу метрологічну точність ніж аналогічні давачі, що розроблені іншими авторами [11-15]. Його технічні характеристики:

- діапазон вимірювань D_{\max} , кН 100;
- номінальне значення робочого коефіцієнту передачі електричного кола (РКП), що визначається як відношення вихідного сигналу до напруги живлення під впливом силового навантаження, рівного D_{\max} , при прискоренні земного тяжіння $g = 9,8107$ м/с, мВ/В від 0,5 до 3,0;
- значення початкового коефіцієнту передачі (ПКП) (для нового давача) $\pm 1,5\%$;
- зміна значення ПКП протягом 12 місяців від моменту виготовлення давача $\geq \pm 5\%$;
- ймовірність безвідмовної роботи протягом 2000 годин 0,9;
- середній строк служби, років 4;
- виконання за захистом від зовнішніх дій згідно ГОСТ 12997-84.

Основу розробленого давача складає пружний елемент у вигляді конусної мембрани. Мембрана сприймає силове навантаження вершиною конуса, що закінчується сферичною поверхнею радіусом $R = 10$ мм. На неї з одного боку діє рівномірне навантаження, а з іншого боку - чотири наклеєних тензорезистора і нормуючі перетворювачі, закріплені на круглій кришці. У центрі мембрани радіальна і тангенціальна напруга кола рівні і однакові за знаком. У міру віддалення від центру вони зменшуються, доходячи до нуля, а потім, змінивши знак, знову збільшуються, досягаючи максимуму в місцях закріплення. Тангенціальна напруга біля краю мембрани у декілька разів

менша за радіальну, тому при проектуванні робочою напругою прийняте радіальне її значення. З цієї причини тензорезистори орієнтовані в радіальному, а не тангенціальному напрямку. При проектуванні давача максимально використані останні досягнення науки і техніки, зокрема перетворювачі нормовані фольгові (ПНФ) для робочих тензорезисторів типу КФ5П1. Тензорезистори КФ5П1 призначені для вимірювання деформацій як проміжні вимірювальні перетворювачі, в умовах мікрокліматичних районів з помірним і холодним кліматом, що відповідає умовам України. Діапазон вимірюваної деформації 3000 мкм/м і струм не більш 20 мА.

Принципова електрична схема давача 4201 ДСТ - 10 приведена на рис. 1.

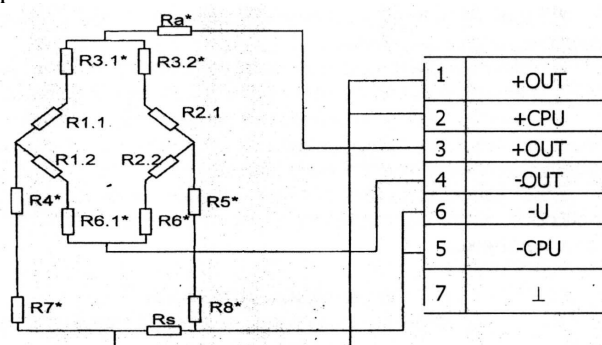


Рисунок 1 – Принципова електрична схема давача 4201 ДСТ – 10

Резистори R 1.1, R 1.2, R 2.1, R 2.2 - (чотири активних тензорезистора типу КФ5П1) спільно з резисторами R 3.1, R 3.2, R 6.1, R 6.2 сполучені за класичною мостовою схемою Уїтстона (М), підключені до електричного джерела постійної напруги (клема 1 і 6). Отже, напруга на виході М (клема 3 і 4) буде пропорційна деформації пружного елемента, тобто пропорційна вимірюваній масі. При цьому R 3.1, R 3.2 є нормуючим фольговим перетворювачем НКП типу ПНФ-Б і служить для правильного балансування плечей моста, а R 6.1, R 6.2 є нормуючим фольговим перетворювачем температури НКП типу ПНФ-1Т. У розробленому давачі перетворювачі ПНФ-Б і ПНФ-1Т виконані з двох половин, які включені в суміжні плечі моста, що дозволяє нормувати НКП і компенсувати зміну температури для гірничої виробки незалежно від знаку

розбалансу. Резистори R 4 і R 5 є нормуючим перетворювачем температури РКП типу ПНФ-2Т. Резистори R 7 і R 8 є нормуючим перетворювачем РКП типу ПНФ-С. Необхідність перетворювачів ПНФ-С і ПНФ-2Т в схемі давача полягає в тому, що їх включення дає змогу відстежувати напругу електричного живлення на вхідній діагоналі моста Уїтстона, нормуючи РКП і компенсуючи температурні зміни під час вимірювань для гірничої виробки.

Давач 4201 ДСТ-10 пройшов метрологічну атестацію у складі МСК "МАК-2" Рис. 2.

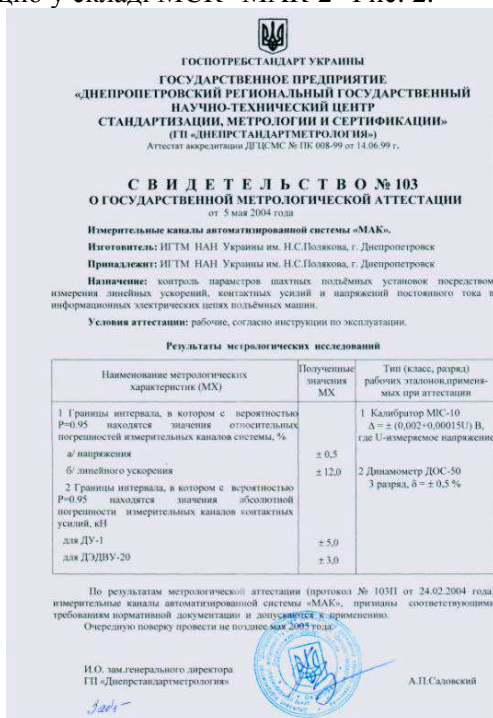


Рисунок 2 - Державна метрологічна атестація

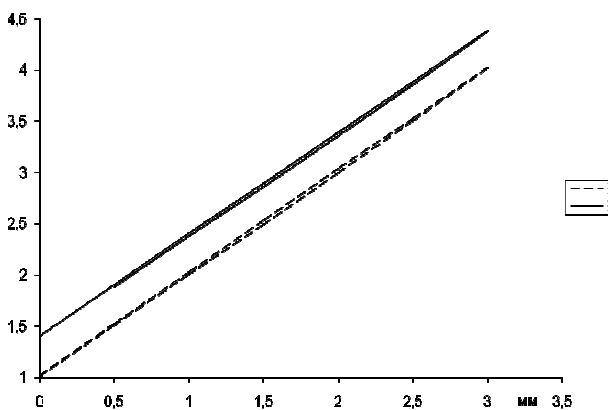


Рисунок 3 – Градувальна характеристика експериментального зразка давача 4201 ДСТ-10 на гістерезис

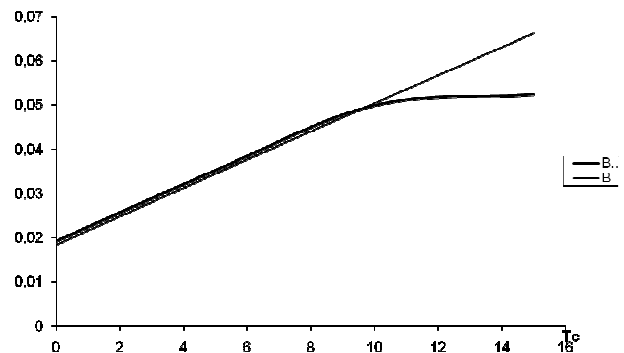


Рисунок 4 – Характеристики експериментального зразка давача 4201 ДСТ-10 без прогрівання (В.) і з попереднім прогріванням (В)



Рисунок 5 – Зразок запобіжного ковпачка давача 4201 ДСТ - 10, зношений в результаті шахтних вимірювань на п'ятидесятитонному скіповому підйомі шахти "Ювілейна" ВАТ "Суха Балка"

Паспортні дані перших експериментальних давачів 4201ДСТ-10 наведено в табл. 1.

В ході натурних робіт було виявлено, якщо градувальна характеристика кожного давача має лінійну залежність, а градувальні криві давача, зняті при однаковій чутливості, то кожен давач спочатку має бути проградуваний зі своїм запобіжним ковпачком. Кожен давач як під час градування, так і під час шахтних вимірювань на підйомній посудині має бути закріплений за одним і тим же каналом. Градування давача 4201 ДСТ - 10 виконується статичним способом за допомогою гідравлічного пресу. Динамічне градування, на наш погляд, зайве, оскільки нижня частота корисного сигналу набагато вища вимірюваної максимальної частоти.

Таблиця 1 – Паспортні дані перших експериментальних давачів 4201ДСТ-10.

№п/п	Параметр	Давач №1	Давач №2	Давач №3
1.	Діапазон вимірювань, D,т	10	10	10
2.	РКП, мВ/В	2,26	2,25	2,25
3.	ПКП, мВ/В	0,061	0,042	0,007
4.	Максимальна похибки % D_{max}	1.3	1,3	1,3
5.	Вхідний опір, Ом,	404,4	403,3	431,9
6.	Вихідний опір, Ом,	404,4	403,3	402,8
7.	Напруга живлення максимальна, В	12	12	12
8.	Опір ізоляції, МОм	50	50	50

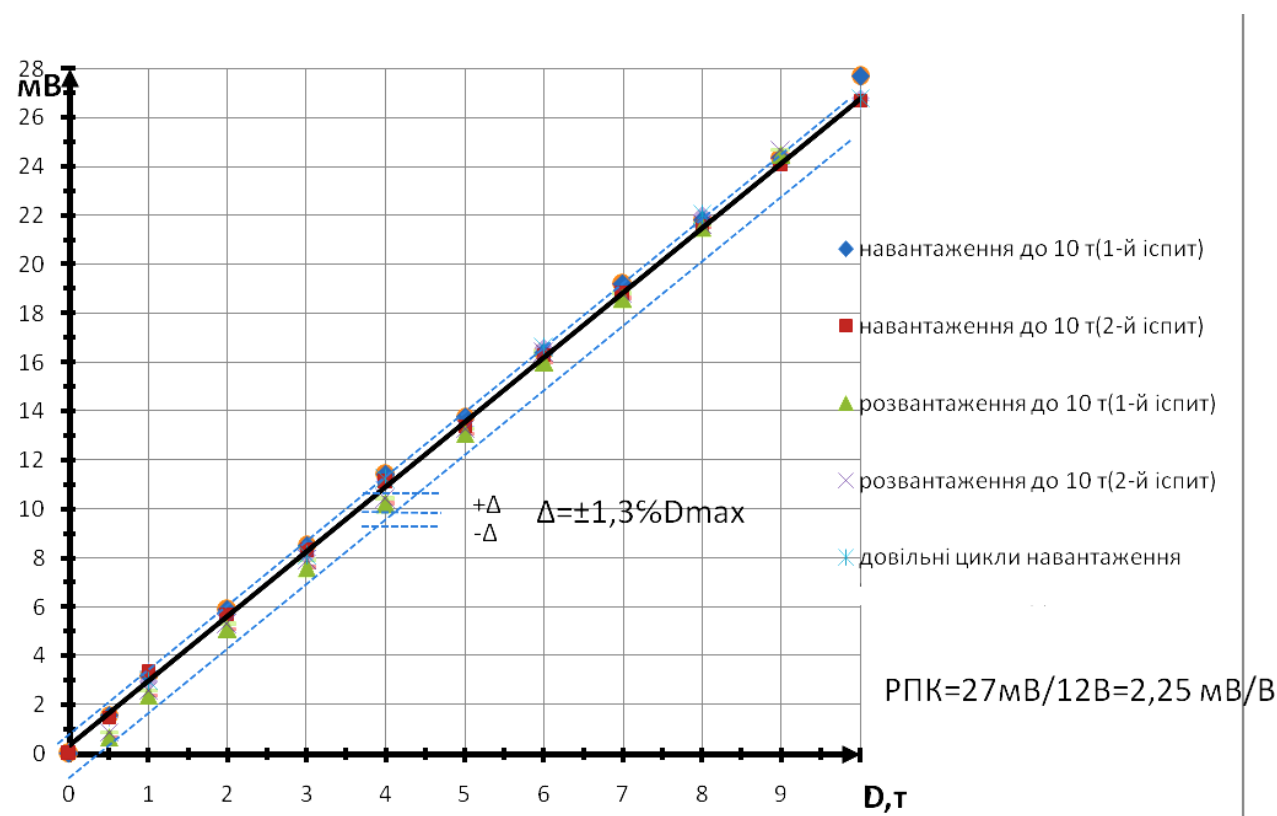


Рисунок 6 – Градувальна характеристика експериментального зразка давача 4201 ДСТ-10

Експлуатація давачів 4201 ДСТ-10 в складних умовах шахт Кривбасу виявила їх надійність табл. 2.

На теперішній час давачами 4201 ДСТ-10 досліджено жорстке армування шахти "Експлуатаційна" стовбурів: вантажний №1, №2 і допоміжний ЗЖРК (термін служби 43 роки,

глибина 940 метрів), шахти "Ювілейна" (термін служби 31 рік, глибина 1340 метрів) і шахти ім. М. Фрунзе (термін служби 50 років, глибина 1135 метрів) ВАТ "Суша Балка" (рис. 7-8).

Таблиця 2 – Характеристики експериментальних давачів 4201ДСТ-10, отримані при лабораторних і шахтних випробуваннях

№п/п	Заводський №	НКП мВ/В	РКП мВ/В
1	0106	0,012	2,15
2	0206	0,069	1,90
3	0306	0,007	2,25
4	0406	0,011	2,51
5	0506	0,010	1,86
6	0606	0,002	2,02
7	0706	-0,047	2,38
8	0806	0,012	2,15



Рисунок 7 – Експериментальний зразок давача 4201 ДСТ – 10, зруйнований в результаті шахтних випробувань на шахті «Експлуатаційна» ЗЗРК



Рисунок 8 – Експериментальний зразок запобіжного ковпака давача 4201 ДСТ-10, зруйнований в результаті шахтних випробувань на шахті «Експлуатаційна» ЗЗРК

Висновки

На основі досліджень був створений давач зусилля і навантаження, призначений для експлуатації у важких гірничих умовах: з розширеним діапазоном робочих температур, ступенем захисту IP67, вологостійкий в агресивному середовищі і конструктивно

виконаний так, щоб не порушувати вимоги безпеки в гірничих виробках. З цих критеріїв, обрано найкраще рішення для кожного набору обмежень.

Виконані дослідження і впровадження в гірничій галузі дозволяють при наявності зацікавленості та фінансування поширити отриманий досвід вирішення проблеми на аналогічні давачі.

Список використаних джерел

1. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 176 с.
2. Статников Р.Б., Матусов И.Б. О недопустимых, допустимых и оптимальных решениях в задачах проектирования. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2012. № 4. [Электронный ресурс]. URL: <http://naukarus.com/o-nedopustimyh-dopustimyh-i-optimalnyh-resheniyah-v-zadachah-proektirovaniya.html>
3. Greco, Salvatore, Ehrgott, Matthias, Figueira, José Rui. Trends in Multiple Criteria Decision Analysis. Berlin: Springer. 2010. 412 p.
4. How many different types of force transducer are there? (FAQ - Force). URL: [http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-different-types-of-force-transducer-are-there-\(faq-force\)#straingaugelcs.html](http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-different-types-of-force-transducer-are-there-(faq-force)#straingaugelcs.html).
5. Шушкевич В.Я. Основы электротензометрии. Минск: Высшая школа 1975. 352с.
6. Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин. М. Машиностроение, 1979. 480с.
7. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М.: МАШГИЗ, 1962. 456 с.

8. Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкций машин и приборов. М. Издательство МГТУ им. И.Э. Баумана, 2014. 480с.

9. Сахневич С.Ю., Алтухова Е.И. Использование бесконтактных устройств контроля в схемах защиты шахтных подъемных установок. *Республ. межвед. науч. техн. сб.* 2016. Вып. 97. С. 17-21.

10. Датчики силоизмерительные тензорезистивные 4201 ДСТ (МК 150. 420. 000 ТЕ). Днепропетровск: Метриком, 2003. 8с.

11. Gotzman W. Beschleunigungsmesser zur Prufung von Schachtfuhungen. Dortmund: Bellman H., 1962. P. 156-168.

12. Sebel Z. Tensometrike mereni dynamiky viceianovych teznich zarizeni. *UHLI.* 1981. No 20. P. 453-461.

13. А.с. 594000 СРСР, МКИ В66 В 7/02. Направляющий башмак подъемника / А.Е. Гавруцкий, Г.Н. Мушинский, В.И. Костогриз, Ю.М. Гречуха. (СССР). № 2412991/29-11; Заявлено 19.10.76; Оpubл. 25.02.78, Бюл. №7. 2с.

14. А.с. 644705 СРСР, МКИ В66 В 7/02. Направляющий башмак подъемника / А.Е. Гавруцкий, Г.Н. Мушинский, В.И. Костогриз. (СССР).- № 2469703/29-11; Заявлено 04.04.77; Оpubл. 30.01.79, Бюл. №4. 2 с.

15. Stefanescu D. M. Handbook of force transducers. *Principles and components.* Berlin: Springer. 2011. 612 с.

References

1. Sobol I.M., Statnikov R.B. Vyibor optimalnyh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami. М.: Drofa, 2006. 176p. [in Russian]

2. Statnikov R.B., Matusov I.B. O nedopustimiyh, dopustimiyh i optimalnyh resheniyah v zadachah proektirovaniya. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin.* 2012. No 4. [in Russian] URL: <http://naukarus.com/onedopustimiyh-dopustimiyh-i-optimalnyh-resheniyah-v-zadachah-proektirovaniya.html>

3. Greco Salvatore, Ehrgott Matthias, Figueira Jose Rui. Trends in Multiple Criteria Decision Analysis. Berlin: Springer. 2010. 412 p.

4. How many different types of force transducer are there? (FAQ - Force). URL: [http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-](http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-different-types-of-force-transducer-are-there-(faq-force)#strainingaugelcs.html)

[different-types-of-force-transducer-are-there-\(faq-force\)#strainingaugelcs.html](http://www.npl.co.uk/reference/faqs/how-many-different-types-of-force-transducer-are-there-(faq-force)#strainingaugelcs.html).

5. Shushkevich V.Ya. Osnovyi elektrotenzometrii. Minsk: Vyisheyshaya shkola 1975. 352p. [in Russian]

6. Osadchiy E.P. Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mehanicheskikh velichin. М.: Mashinostroenie, 1979. 480p. [in Russian]

7. Andreeva L.E. Uprugie elementy priborov. М.: MASHGIZ, 1962. 456 p. [in Russian]

8. Gavryushin S.S., Baryishnikova O.O., Boriskin O.F. Chislennyiy analiz elementov konstruksiy mashin i priborov. М.: Izdatelstvo MGTU im. I.E. Baumana, 2014. 480 p. [in Russian]

9. Sahnevich S.Yu., Altuhova E.I. Ispolzovanie beskontaktnykh ustroystv kontrolya v shemah zaschityi shahtnykh pod'emnykh ustanovok. *Respubl. mezhved. nauch. tehn. sb.* 2016. Vol. 97. P. 17-21. [in Russian]

10. Datchiki siloizmeritelnyie tenzorezistivnyie 4201 DST (МК 150. 420. 000 ТЕ). Dnepropetrovsk: Metrikom, 2003. 8p. [in Russian]

11. Gotzman W. Beschleunigungsmesser zur Prufung von Schachtfuhungen. Dortmund: Bellman H., 1962. P. 156-168.

12. Sebel Z. Tensometrike mereni dynamiky viceianovych teznich zarizeni. *UHLI.* 1981. No 20. P. 453-461.

13. А.с. 594000 SRSR, МКИ В66 В 7/02. Napravlyayuschiy bashmak pod'emnika / А.Е. Gavrutskiy, G.N. Mushinskiy, V.I. Kostogriz, Yu.M. Grechuha. (SSSR). No 2412991/29-11; Заявлено 19.10.76; Оpubл. 25.02.78, Byul. 7. 2p. [in Russian]

14. А.с. 644705 SRSR, МКИ В66 В 7/02. Napravlyayuschiy bashmak pod'emnika / А.Е. Gavrutskiy, G.N. Mushinskiy, V.I. Kostogriz. (CSCR). No 2469703/29-11; Заявлено 04.04.77; Оpubл. 30.01.79, Byul. 4. 2 p. [in Russian]

15. Stefanescu D. M. Handbook of force transducers. Principles and components. Berlin: Springer. 2011. 612 p.