

А.О. МЕЛЬНИЧЕНКО, М.М. РУБАНКА, В.П. МІСЯЦЬ

Київський національний університет технологій та дизайну

О.С. ПОЛІЩУК

Хмельницький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ МАШИНИ УММ-5 ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проведено аналіз сучасних машин для випробування конструкційних матеріалів. Проведено аналіз машин для випробування конструкційних матеріалів, які потребують удосконалення. Визначено шляхи можливого удосконалення існуючих машин. Визначено переваги і недоліки відомих засобів для вимірювання зусиль і деформації. Розроблено елементи конструкції та схемні рішення для удосконалення машини УММ-5, що використовується для експериментального визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів в лабораторії опору матеріалів кафедри прикладної механіки та машин Київського національного університету технологій та дизайну. Результати досліджень можуть бути використані для удосконалення діючого устаткування на машинобудівних підприємствах галузі.

Ключові слова: конструкційні матеріали, міцність, машина для випробування, датчик, електрична схема, комп'ютер.

A. MELNYCHENKO, M. RUBANKA, V. MISIATS

Kyiv National University of Technologies and Design

O. POLISHCHUK

Khmelnitsky National University

IMPROVEMENT OF UMM-5 MACHINE FOR DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTION MATERIALS

Determining the mechanical characteristics of structural materials is very important in the manufacture of products from them for certain operating conditions, in particular under the influence of external deforming forces. The maximum allowable values of relative elongation and tensile strength in tension are determined on a test bench of the type of rupture machine.

The rapid pace of computerization of all aspects of human activity has led to the fact that today computers, and, above all, personal computers, have become an essential attribute of various technical systems. This also applies to modern control and data collection systems, control and measurement and laboratory equipment, ie any complexes, the main task of which is the processing and interpretation of information coming from the "outside world".

As a result, developers and users of specialized systems face the task of adequate docking of devices that receive information from the outside world, namely sensors of various types, with a personal computer, which is the central node of such a system and perform tasks of coordinating system, information processing comes and issues it to the user in the most convenient form for him.

The analysis of modern machines is conducted for the test of construction materials. The analysis of machines is conducted for the test of construction materials that need an improvement. Ways of possible improvement of existing machines are determined. The advantages and disadvantages of the known means for measuring forces and deformation are determined. The paper proposes the improvement of test machines of obsolete type by equipping them with systems for measuring forces and displacements without significantly changing the basic structures. The methodological and theoretical bases of the study are the main provisions of theoretical mechanics, strength of materials and machine elements. Was developed the elements of construction and circuit solutions for improvement the UMM-5 machine, which is used for experimental determination of mechanical characteristics of construction materials in the strength of material laboratory of the Department of Applied Mechanics and Machines of Kyiv National University of Technology and Design. The developed system of combined effort measurement advantageously combines the advantages of classical mechanical meters and electronic data recording means. Improving existing testing machines with the help of the developed system is attractive with low re-equipment costs and does not require significant changes in their design. The research results can be used to improve the existing equipment at machine-building enterprises of the industry.

Keywords: construction materials, strength, test machine, sensor, electrical scheme, computer.

Вступ

Визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів має дуже важливе значення при виготовленні виробів з них для певних умов експлуатації, зокрема при впливі зовнішніх деформуючих сил. Максимально допустимі значення відносного подовження і розривної міцності при розтягуванні визначаються на випробувальному стенді типу розривної машини.

Стрімкі темпи комп'ютеризації всіх сторін людської діяльності призвели до того, що сьогодні комп'ютери, і, перш за все, персональні ЕОМ, стали неодмінним атрибутом самих різних технічних комплексів. Це стосується і сучасних систем управління та збору даних, контрольно-вимірювального та лабораторного обладнання, тобто будь-яких комплексів, основним завданням яких є обробка та інтерпретація інформації, що надходить із "зовнішнього світу".

В результаті перед розробниками і користувачами спеціалізованої системи постає завдання адекватної стикування пристроїв, які сприймають інформацію із зовнішнього світу, а саме датчиків різного типу, з персональним комп'ютером, що є центральним вузлом такої системи і виконують завдання координації роботи системи, обробки інформації, що надходить і видачі її користувачеві в найбільш зручною для нього формі.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є процеси випробувань конструкційних матеріалів при їх деформуванні і руйнуванні. При вирішенні поставлених задач були використані сучасні методи визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів, що базуються на основних положеннях теоретичної механіки, опору матеріалів та деталей машин.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання модернізації лабораторних машин для визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів, завданням досліджень є визначення можливих шляхів удосконалення існуючого обладнання лабораторії опору матеріалів, що дозволить підвищити точність експерименту, істотно полегшити обробку отриманих результатів, їх систематизацію, зберігання, а також організувати видачу інформації, як в процесі вимірювання, так і по його закінченні в найбільш зручному для користувача вигляді.

Результати та їх обговорення

Для проведення випробувань конструкційних матеріалів на розтяг і стискання застосовують спеціальні пристрої (універсальні розривні машини, випробувальні преси тощо) [1-4]. Розривна машина має спеціальні затискачі, в яких закріплюється випробуваний зразок, що піддається дії поступово зростаючого навантаження, а також пристрої для вимірювання діючого на зразок зусилля та величини деформації. Для визначення механічних характеристик конструкційних матеріалів застосовуються універсальні розривні машини самих різних розмірів, параметрів і відповідно технічних характеристик, розраховані на навантаження від сотих часток ньютонів до багатьох кілоньютонів [5, 6]. Вимоги до такого роду обладнання регламентуються рядом державних стандартів [7-9]. Так, розривні машини, які застосовуються при випробуванні гуми та пластмаси на розтяг, згин і стискання за постійної швидкості переміщення повинні за своїми технічними характеристиками задовольняти вимогам стандарту ДСТУ ISO 5893:2019. Розривні машини можуть мати різний привід – ручний, електромеханічний (електродвигун – механічна передача) та електродвигальний. Найбільш розповсюджені машини з електромеханічним приводом, тоді як електродвигальний застосовують в обладнанні для випробувань матеріалів при значно більших робочих навантаженнях.

На рис. 1 представлено зовнішній вигляд універсальної розривної машини для випробування конструкційних матеріалів, якою обладнано лабораторію опору матеріалів кафедри прикладної механіки та машин Київського національного університету технологій та дизайну.

Універсальна випробувальна розривна машина УММ-5 призначена для статичних випробувань на розтяг, стиск, зріз металевих зразків та інших матеріалів в межах технічних можливостей машини. Розривна машина УММ-5 побудована за принципом розривних машин з механічним навантаженням зразка і з важливо-маятниковим силовимірювачем.

Дане обладнання відноситься до випробувальних машин морально застарілого типу та потребує модернізації, метою якої є доведення метрологічних характеристик до відповідності вимогам стандартів ASTM, ISO, DIN, GB і дооснащення необхідними пристроями вимірювання.

На сьогоднішній час морально застарілі випробувальні машини можуть бути удосконалені в різному ступені глибини модернізації. Авторами пропонується наступний варіант модернізації даного обладнання, що передбачає встановлення електронного реєстратора. Регулювання швидкості навантаження залишається без зміни (виключно за рахунок механічної коробки передач). Електронний реєстратор встановлюється на розривну машину в комплекті з:

- мікропроцесорний блок зі спеціальним програмним забезпеченням (ПЗ);
- датчик зусилля (один або два);
- датчик переміщення;
- персональний комп'ютер (ПК);
- принтер.

Цей варіант модернізації дозволить: проводити всі види випробувань в межах технічних можливостей машини; реєструвати графіки випробувань та відображати всі поточні значення вимірюваних величин на дисплеї в режимі реального часу; аналізувати отримані дані серії випробувань з накладенням кривих; автоматично обробляти отримані результати та представляти їх у вигляді графіків і протоколів з можливістю роздрукування; при необхідності експортувати отримані дані в програмне забезпечення «Microsoft Office Excel 2007» та «Microsoft Office Word 2007», «Adobe Acrobat XI Pro»; працювати з бібліотеками методів випробувань згідно нормативної документації; створювати короткі і розширені звіти по результатам випробувань; автоматично зупиняти процес випробування при руйнуванні зразка або виконанні заданих умов.

Перед модернізацією необхідно провести технічне обслуговування механічної частини навантажувального пристрою і при необхідності здійснити ремонт.

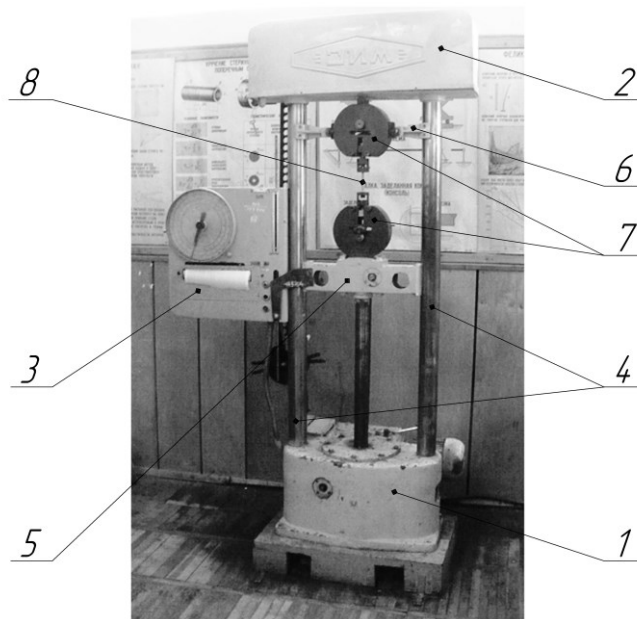


Рис. 1. Зовнішній вигляд універсальної випробувальної розривної машини УММ-5:
 1 – силова частина; 2 – силовимірювальна частина; 3 – механізм самописця; 4 – колони; 5 – нижня рухома траверса;
 6 – верхня нерухома траверса; 7 – захоплювачі; 8 – випробувальний зразок

Для удосконалення системи вимірювання зусилля, що діє на верхній захват раціонально використати резисторний датчик кута повороту, який потрібно встановити на вісь обертання стрілки динамометра. При цьому кут повороту датчика буде прямо пропорційний зусиллю, що діє на верхній захват.

При проведенні експерименту результати візуального спостереження (за шкалою навантажень) максимального навантаження перед руйнуванням зразка будуть використані для тарування діаграми, яка отримана в цифровому вигляді.

Розроблена авторами статті структурна схема системи вимірювання і реєстрації отриманих даних під час випробувань на розривній машині УММ-5 представлена на рис. 2.

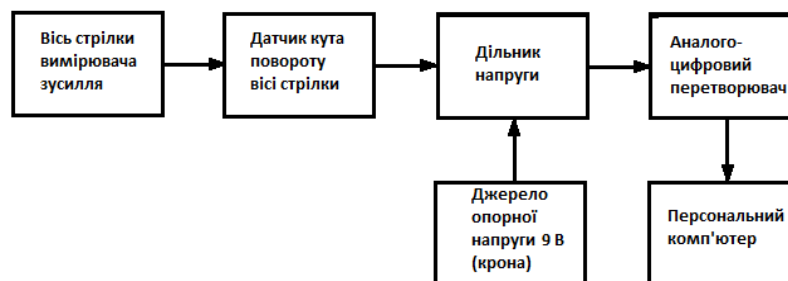


Рис. 2. Схема структурна системи вимірювання і реєстрації даних випробувальної машини УММ-5

У відповідності до схеми, вісь стрілки вимірювачів зусилля (крутного моменту) випробувальних машин жорстко з'єднується з валом резисторного датчика кута повороту за допомогою гнучкої муфти (трубка з ПВХ). Завдяки цьому кут повороту валу датчика буде відповідати куту повороту осі стрілки вимірювача.

Для перетворення кутового показника датчика в електричний сигнал слугує дільник напруги, який формує вихідну напругу в залежності від опору резисторного датчика. Початковий рівень напруги з дільника визначається значенням опорної напруги, яка може бути отримана з елемента живлення, або стабілізованого електричного блоку.

Для перетворення аналогового сигналу з дільника напруги в цифровий сигнал слугує аналого-цифровий перетворювач, який підключений до персонального комп'ютера через USB порт [10-12].

Підключення виходу підсилювача до комп'ютера може бути виконано за допомогою двоканального аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з USB виходом BA8020 (рис. 3), який може використовуватися для аналізу низькочастотних аналогових сигналів, реєстрації тривалих повільно змінних процесів, а також дослідження двійкових сигналів.



Рис. 3. Зовнішній вигляд аналого-цифрового перетворювача з USB виходом BA8020

Для того, щоб отримати з вхідної напруги опорного джерела лише її частину використовується дільник напруги (voltage divider). Це схема, яка будується на основі пари резисторів (рис. 4).

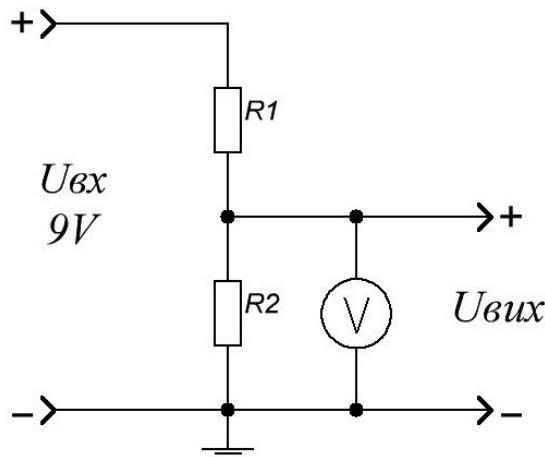


Рис. 4. Схема дільника напруги

Наприклад, на вхід подається напруга величиною 9 В. Але яку напругу отримаємо на виході $U_{вих}$ (рис. 3.4)? Припустимо, що в схемі встановлено резистори з наступним опором: $R_1=400$ Ом; $R_2=500$ Ом.

Струм, що протікає через резистори R_1 і R_2 однаковий, оскільки до виходу $U_{вих}$ нічого не підключено. Загальний опір пари резисторів при послідовному з'єднанні визначається за наступним виразом: $R_{заг}=R_1+R_2=900$ Ом.

Силу струму, що протікає через резистори можна вираховувати за формулою: $I=U/R_{заг}=9/900=0,01$ А=10 мА.

Тепер, коли нам відомий струм, що протікає через резистор R_2 , розрахуємо напругу на ньому: $U_{вих}=I \cdot R_2=0,01 \cdot 500=5$ В.

Або, якщо залишити формулу для визначення вихідної напруги в загальному вигляді, отримуємо:

$$U_{вих} = U_{вх} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{1}$$

Так за допомогою пари резисторів ми змінили значення вихідної напруги з 9 до 5 В. Це простий спосіб отримати декілька різних напруг в одній схемі, залишивши при цьому тільки одне джерело живлення.

Якщо в наведеній вище схемі (рис. 4) замінити R_1 або R_2 на резистор змінного опору (датчик), $U_{вих}$ буде змінюватися в залежності від зовнішніх умов, що впливають на датчик. Підключивши цю вихідну напругу до аналогового входу аналого-цифрового перетворювача, можна отримувати інформацію про рівень діючих зусиль і моментів.

Значення вихідної напруги при певних параметрах системи можна розрахувати, зіставивши документацію на змінний компонент і загальну формулу розрахунку $U_{вих}$.

Якщо замість постійного резистора R_1 встановити резистор змінного опору, то можливо отримати залежність вихідної напруги від положення повзунка резистора, тобто він буде виконувати функцію датчика переміщення або кута повороту.

В якості датчика використано змінний резистор типу ПТП (потенціометр теплостійкий прецизійний) з номінальним опором 630 Ом (рис. 5) [13, 14].

Визначимо значення опорного постійного резистора R_2 , який потрібно встановити в дільнику напруги. З формули (1) маємо:

$$R_1 = \left(\frac{U_{ex}}{U_{вих}} - 1 \right) \cdot R_2 \quad (2)$$

Отже значення опору постійного резистора R_1 для зменшення напруги з 9В до 2В повинно становити:

$$R_1 = \left(\frac{9}{2} - 1 \right) \cdot 630 = 2205 \text{ Ом.}$$

Приймаємо стандартний резистор з опором 2,2 кОм.

Тоді при максимальному опорі потенціометра $R_2=630$ Ом, вихідна напруга з дільника становитиме:

$$U_{вих} = 9 \cdot \frac{630}{2200 + 630} = 2,004 \text{ В.}$$

Очевидно, що при повністю вимкненому потенціометрі $U_{вих}=9$ В.

Помилка! Не можна створювати об'єкт із кодів полів редагування.



Рис. 5. Зовнішній вигляд потенціометра теплостійкого прецизійного, що було включено до електричної схеми дільника напруги та з'єднано гнучким валом з віссю стрілки динамометра випробувальної розривної машини УММ-5

Для роботи з АЦП використано спеціалізоване програмне забезпечення «Disco Application», яке містить драйвер пристрою і програму для візуалізації результатів вимірювання на персональному комп'ютері. Також, при роботі системи відбувається запис цифрових даних вимірювання у файли формату «txt», які можуть бути використані для подальшої обробки в додатках «Microsoft Office Excel 2007», «MathCad», «Graphical Analis» та інших, що підтримують формат «txt» [15]. Вікно програми для налаштувань і відображення даних вимірювань представлено на рис. 6.

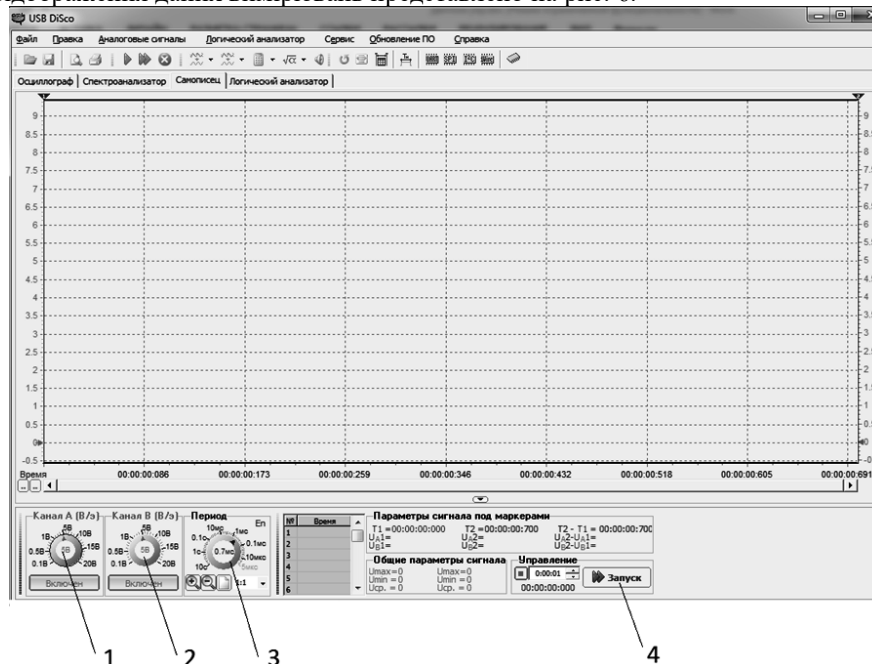


Рис. 6. Вікно програми для налаштувань і відображення даних (змінення входної напруги в часі):

1 – встановлення межі напруги каналу А; 2 – встановлення межі напруги каналу В; 3 – встановлення періоду відліку часу; 4 – запуск програми для запису даних

Після встановлення на випробувальну машину УММ-5 розробленої системи вимірювання зусилля було проведено випробування зразків конструкційних матеріалів [16, 17] на розтяг до моменту розриву [7-9].

На рис. 7. представлено зовнішній вигляд та ескіз випробувального зразка виготовленого із сталі Ст.3. Випробувальний зразок мав наступні розміри: початкова довжина робочої частини $l_0=80$ мм; діаметр робочої частини $d_0=7,3$ мм.

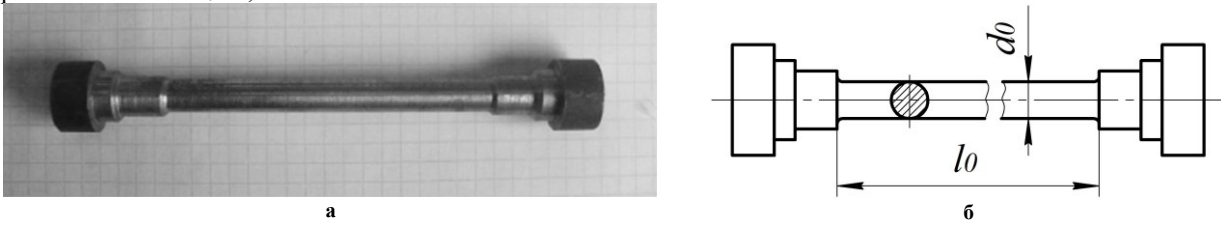


Рис. 7. Зразок для випробування на розтяг: а – зовнішній вигляд; б – ескіз

В ході випробування зразка на розтяг до моменту розриву проводилось паралельне вимірювання зусилля і реєстрація даних за допомогою існуючої системи (стрілочний динамометр) і самописця (рис. 8, 9) та електронної системи на основі персонального комп'ютера (рис. 10).

В результаті випробувань отримано наступні результати: кінцева довжина робочої частини зразка $l_k=94$ мм; кінцевий діаметр утвореної шийки зразка $d_w=5,2$ мм; максимальне зусилля за показниками динамометра $F_{max}=2950$ кгс = 29500 Н.

При цьому напруга на виході з датчика кута повороту стрілки динамометра зросла від 2 В (мінімальне зусилля) до 8 В (максимальне зусилля).

Отримані дані легко використати для масштабування і відображення діаграми розтягу зразка до моменту розриву в будь якому програмному середовищі, наприклад в «Microsoft Office Excel 2007».

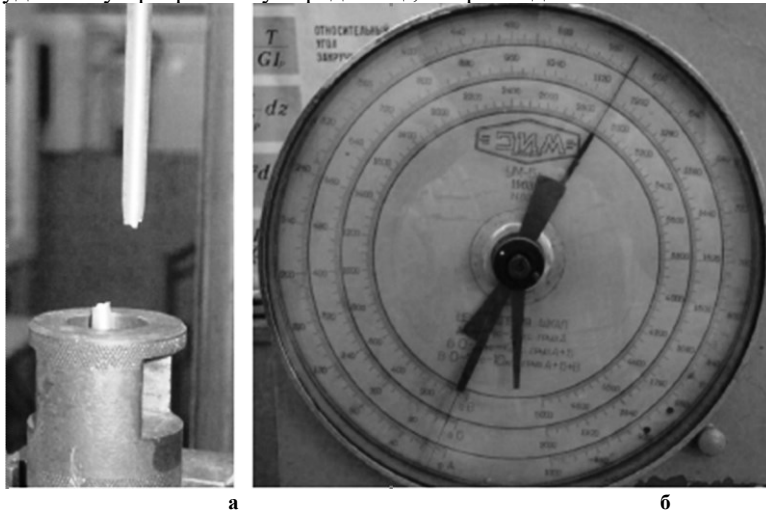


Рис. 8. Результат випробувань зразка на розтяг: а – момент розриву зразка; б – фіксація стрілки динамометра в момент розриву зразка

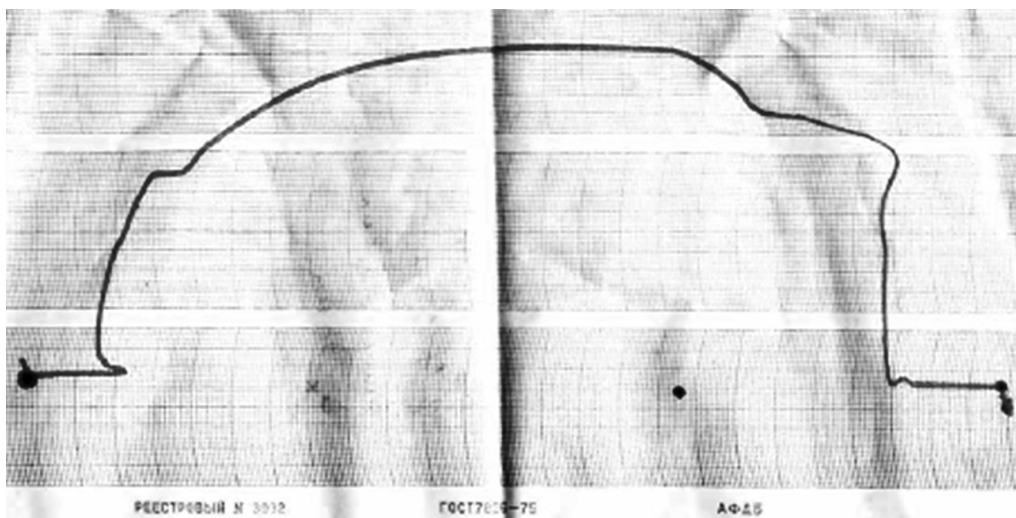


Рис. 9. Діаграма розтягу зразка до моменту розриву, отримана на самописці випробувальної машини УММ-5

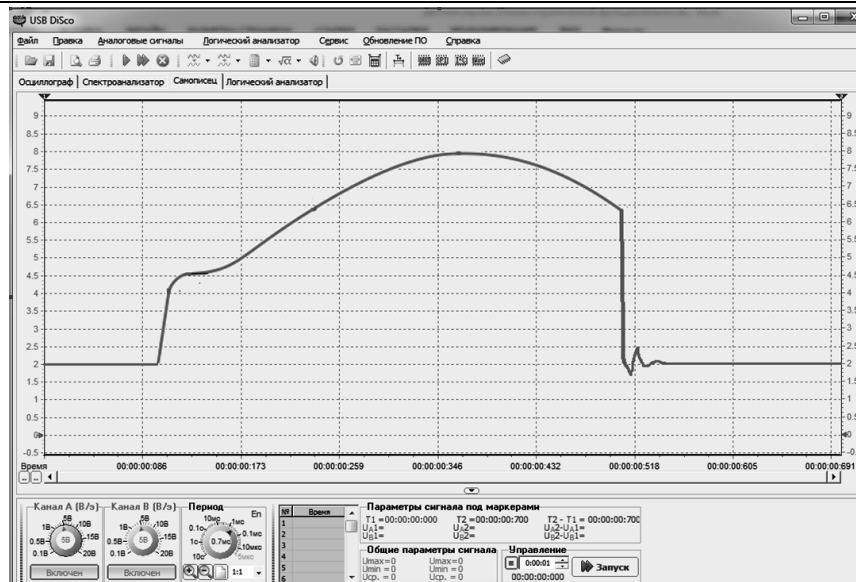


Рис. 10. Діаграма розтягу зразка до моменту розриву, отримана на комп'ютері за допомогою розробленої системи вимірювання

З рис. 9 та 10 видно, що якість діаграми отриманою за допомогою нової системи вимірювання значно краща. Це можна пояснити тим, що система механічного самописця вже достатньо зношена за багато років експлуатації, при її роботі мають місце уривчасті обертання валика і переміщення «пера», а також проковзування паперової стрічки.

Висновки

Аналітичний огляд сучасного обладнання для випробування конструкційних матеріалів показав тенденцію застосування в них електронних систем вимірювання та реєстрації даних з використанням персонального комп'ютера. Для вимірювання силових параметрів переважно використовують датчики з прямим перетворенням зусилля (деформації) в електричний сигнал.

Морально застарілі випробувальні машини мають системи механічного навантаження зразків, що в повній мірі відповідають сучасному рівню техніки. В таких машинах доцільно удосконалювати системи вимірювання і реєстрації даних.

Розроблена система комбінованого вимірювання зусиль вигідно поєднує переваги класичних механічних вимірювачів і електронні засоби реєстрації даних.

Удосконалення існуючих випробувальних машин за допомогою розробленої системи приваблює малими витратами на переобладнання і не вимагає значних змін їх конструкції.

Література

1. Ванкевич П.І. Лабораторний практикум з опору матеріалів : навчальний посібник / П.І. Ванкевич. – Львів : Магнолія 2006, 2019. – 224 с.
2. Вольмир А.С. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / А.С. Вольмир. – М.: МАИ, 1997. – 352 с.
3. Цурпал И.А. Сопротивление материалов. Лабораторные работы / И.А. Цурпал, Н.П. Барабан, В.М. Швайко. –К. : Вищ. шк., 1988. –247 с.
4. Афанасьев В.А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов / В.А. Афанасьев, В.А. Марьин. – М. : Наука, 1975. –287 с.
5. Испытательные машины [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://asma.com.ua/content/ispytatelnye-mashiny>
6. Машини випробувальні [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ukrintech.com.ua/ua/mashyny-vyprobuvalni/>
7. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування при кімнатній температурі : ДСТУ EN 10002-1:2006 (EN 10002-1:2001, IDT). - [Чинний від 2008-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 34 с. – (Національний стандарт України).
8. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 5. Метод випробування за підвищених температур : ДСТУ EN 10002-5:2006 (EN 10002-5:1991, IDT). - [Чинний від 2018-03-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2018. – 26 с. – (Національний стандарт України).
9. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять : ДСТУ 2825-94. - [Чинний від 1996-01-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 1996. – 42 с. – (Національний стандарт України).
10. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютером IBM PC: Перевод с английского/ Под редакцией У. Томкинса и Дж. Узбстера: - М.: Мир, 1992. – 592с.

11. Вимірювальні перетворювачі (сенсори) : підручник / В. М. Ванько, Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, Ю. В. Яцук ; ред.: Є. С. Поліщук, В. М. Ванько ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. — 580 с.
12. Теорія інформації (інформаційно-вимірювальні системи, похибки, ідентифікація): навчальний посібник / П. Д. Стухляк, О. В. Іванченко, А. В. Букетов, М. А. Долгов. — Херсон: Айлант, 2011. — 371 с.
13. Высокоточные преобразователи угловых перемещений / Э.Н. Асиновский, А.А. Ахмеджанов, М.А. Габидулин и др. ; под общ. ред. А.А. Ахмеджанова. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 128 с.
14. Резисторы : справочник / В. В. Дубровский, Д. М. Иванов, Н. Я. Патрусевич и др. ; под ред. И. И. Четверткова и В. М. Терехова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Радио и связь, 1991. — 528 с.
15. Рубанка М. М. Експериментальні дослідження динаміки роторної дробарки для переробки відходів легкої промисловості / М. М. Рубанка, В. П. Місяць // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія "Технічні науки". - 2016. - № 1 (94). - С. 27-35.
16. Пахолук А.П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали : навч. посіб. / А. П. Пахолук, О. А. Пахолук. - Львів : Світ, 2005. — 172 с.
17. Василенко І.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали : навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів / І. І. Василенко, В. В. Широков, Ю. І. Василенко. - Львів : Магнолія-2006, 2007. - 242 с.

References

1. Vankevych P.I. (2019). Laboratornyi praktikum z oporu materialiv [Laboratory practical work of strength of materials]. Lviv: Mahnoliia 2006 [in Ukrainian].
2. Vol'mir A.S. (1997). Laboratornyy praktikum po soprotivleniyu materialov [Laboratory practical work of strength of materials]. Moscow: MAI [in Russian].
3. Tsurpal I.A., Baraban N.P., Shvayko V.M. (1988). Soprotivlenie materialov. Laboratornye raboty [Strength of materials. Laboratory works]. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].
4. Afanas'yev V.A., Mar'in V.A. (1975). Laboratornyy praktikum po soprotivleniyu materialov [Laboratory practical work of strength of materials]. Moscow: Nauka [in Russian].
5. Ispytatel'nye mashiny [Testing machines] URL: <https://asma.com.ua/content/ispitatelnye-mashiny> (Last accessed: 28.11.2020) [in Russian].
6. Mashyny vyprobuvalni [Testing machines] URL: <https://ukrintech.com.ua/ua/mashyny-vyprobuvalni/> (Last accessed: 28.11.2020) [in Ukrainian].
7. DSTU EN 10002-1:2006 (EN 10002-1:2001, IDT) Metalevi materialy. Vyprovuvannya na roztyah. Chastyna 1. Metod vyprovuvannya pry kimnatnii temperaturi [Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2008. 34 p.
8. DSTU EN 10002-5:2006 (EN 10002-5:1991, IDT) Materialy metalevi. Vyprovuvannya na roztyah. Chastyna 5. Metod vyprovuvannya za pidvyshchennykh temperatur [Materials metallic. Tensile testing. Part 5. Method of testing at elevated temperature]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 2018. 26 p.
9. DSTU 2825-94 Rozrakhunky ta vyprovuvannya na mitsnist. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat [Strength calculation and testing. Terms and definitions of principal conceptions]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine, 1996. 42 p.
10. Tomkins U., Uebster Dzh. (Eds.). (1992). Sopryazhenie datchikov i ustroystv vvoda dannykh s komp'yuterom IBM PC [Pairing sensors and data input devices with an IBM PC]. Moscow: Mir [in Russian].
11. Vanko V. M., Polishchuk Ye. S., Dorozhovets M. M., Yatsuk Yu. V. (2015). Vymiriuvalni peretvoriuvachi (sensory) [Measuring converters (sensors)]. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki [in Ukrainian].
12. Stukhlyak P. D., Ivanchenko O. V., Buketov A. V., Dolhov M. A. (2011). Teoriia informatsii (informatsiino-vymiriuvalni systemy, pokhybky, identyfikatsiia) [Information theory (information-measuring systems, errors, identification)]. Kherson: Ailant [in Ukrainian].
13. Akhmedzhanov A.A. (Eds.). (1986). Vysokotochnye preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy [High-precision angular displacement transducers]. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
14. Chetvertkova I. I., Terekhova V. M. (Eds.). (1991). Rezistory [Resistors]. (2d ed.). Moscow: Radio i svyaz' [in Russian].
15. Rubanka M. M., Misiats V. P. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia dynamiky rotornoi drobarky dlia pererobky vidkhodiv lehkoii promyslovosti [Experimental researches of rotor crusher dynamics are for recycling of light industry wastes]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu - Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design, 1 (94). 27-35.
16. Pakholiuk A. P., Pakholiuk O. A. (2005). Osnovy materialoznavstva i konstruktsiini materialy [Fundamentals of materials science and construction materials]. Lviv: Svit [in Ukrainian].
17. Vasylenko I. I., Shyrokov V. V., Vasylenko Yu. I. (2007). Konstruktsiini ta elektrotekhnichni materialy [Construction and electrical materials]. Lviv: Mahnoliia 2006 [in Ukrainian].

Надійшла / Paper received : 04.12.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.