

DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2020-39-16

УДК: 681.2.084

Приходько А.О.,

Приходько Олексій Сергійович, к.т.н.

<https://orcid.org/0000-0001-8496-1295>

Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА УНІВЕРСАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ МЕХАНІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАТЕРІАЛІВ

Приходько А.О., Приходько О.С. Розробка універсальної установки для механічних випробувань матеріалів.

На основі використання контролера Arduino Nano розроблено компактну та недорогу випробувальну установку, яка дозволяє проводити статичні випробування матеріалів з максимальним навантаженням 200 Н та може використовуватись з навчально-демонстраційною метою під час викладання уроків фізики в школі, курсів механіки, опору матеріалів, теорії пружності тощо у ЗВО.

Ключові слова: випробувальні установки, Arduino Nano, тензодатчик, кроковий двигун

Приходько А.О., Приходько О.С. Разработка универсальной установки для механических испытаний материалов. На основе использования контролера Arduino Nano разработана компактная и недорогая испытательная установка, позволяющая проводить статические испытания материалов с максимальной нагрузкой 200 Н и которая может использоваться в учебно-демонстрационных целях во время преподавания уроков физики в школе, курсов механики, сопротивления материалов, теории упругости и т.д. в высших учебных учреждениях.

Ключевые слова: испытательные установки, Arduino Nano, тензодатчик, шаговый мотор

Prykhodko A.O., Prykhodko O.S. Development of a universal device for mechanical testing of materials. Based on the use of the Arduino Nano controller, a compact and inexpensive universal testing machine has been developed. It allows static testing of materials with a maximum load of 200 N and can be used for educational and demonstration purposes in the teaching of physics lessons at school, courses in mechanics, resistance of materials, theory of elasticity, etc. in higher education.

Keywords: universal testing machines, Arduino Nano, strain gauge, stepper motor

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку технологій кожного року створюються нові матеріали з новими можливостями та параметрами. Для визначення характеристик цих матеріалів, а також для контролю якості використовуються універсальні випробувальні машини. Вони дозволяють визначити якісні та кількісні механічні характеристики матеріалу зразків, якість покриттів, критичні навантаження елементів конструкцій та приладів. Наразі є досить багато різновидів випробувального устаткування: від багатотонних великогабаритних розривних машин та пресів до настільних установок з навантаженням до 100 Н. Випробувальні машини використовуються також і в навчальному процесі для демонстрації закономірностей та діаграм деформування матеріалів. На жаль, в лабораторіях університетів часто можна зустріти досить старе устаткування (60-70-ті роки минулого століття), що не мають інтерфейсу під'єднання до ПК та не дають можливості швидко будувати графіки та візуалізувати результати досліджень у реальному часі. Останнє є дуже важливим для навчального процесу, де часто необхідно демонструвати основні принципи випробувань і проводити досліди (однак без високих вимог до точності). У зв'язку з цим було вирішено виготовити бюджетну настільну випробувальну установку з максимальним навантаженням до 200Н.

Аналіз досліджень. На даний час існує низка готових настільних випробувальних установок з невеликим максимальним навантаженням. Наприклад, випробувальне устаткування від фірми A&D [2], модельний ряд МСТ з максимальним навантаженням від 100 до 2500Н та широким спектром захватів, дозволяє проводити низку досліджень на розтяг, стиск, згин, зминання тощо. Однак через відносно високу вартість, впровадження їх в навчальний (та науковий) процес є проблематичним.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження. Для вибору схеми навантаження у випробувальній установці було проаналізовано переваги та недоліки існуючих конструкцій та розглянуто вимоги до проведення випробувань [2,5,6,8]. Для двоколонної (рис. 1, а) схеми перевагами являється висока навантажувальна здатність, симетричність навантаження, та хороша жорсткість конструкції. Однак, для забезпечення симетричності навантаження необхідна чітка синхронізація переміщень по двох колонах. Це можна реалізувати, наприклад, ремінною передачею, як показано на рисунку. Консольна конструкція (рис. 1, б) передбачає лише один різьбовий вал, простіша в реалізації, компактніша та забезпечує дещо кращий доступ до випробувальних зразків. Проте, внаслідок несиметричного навантаження рухомої частини із захватом, дає суттєвий згинальний момент на вал та лінійні підшипники. Для нашої конструкції був вибраний проміжний варіант (рис. 1, в). Для його реалізації використано один різьбовий вал та дві лінійних направляючих. Враховуючи невелике максимальне навантаження (200 Н), яке має

забезпечувати установку, простоту обробки та виготовлення фанерної конструкції, а також значно нижчу вартість в порівнянні з алюмінієвим профілем, матеріалом конструкції було вибрано фанеру 10 мм. Розрахунок абсолютної деформації показав величину ~18 мкм при максимальному навантаженні. Для розрахунку приймали модуль пружності $E = 9000$ МПа (семишарова фанера впоперек волокон[7]). Відносна деформація рівна 0,0072%, чого більш ніж достатньо для забезпечення жорсткості конструкції.

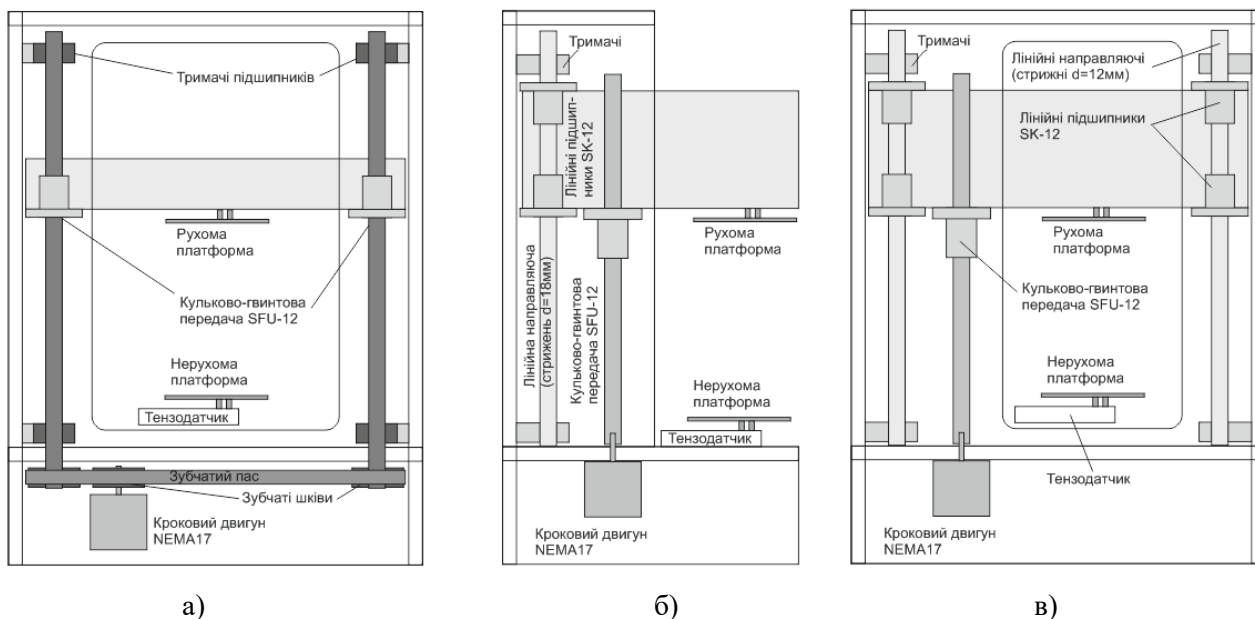


Рис. 1. Схеми навантажень випробувальних установок (а – двоколонна, б – консольна, в – змішана)

Вимірювання навантажень проводилось за допомогою тензодатчика з максимальним навантаженням 200 Н. Для спрощення принципової схеми використано стандартний модуль із спеціалізованою мікросхемою HX711, призначеною для роботи з тензодатчиками, яка містить в собі необхідний набір диференційних операційних підсилювачів, контролер для обробки даних та інтерфейс шини I2C [1].

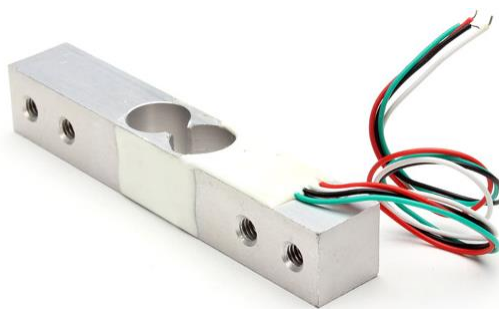


Рис. 2. Вимірювальний елемент з тензодатчиком [4]

Вимірювання переміщень проводилось непрямим способом за допомогою підрахунку імпульсів, що надходять на драйвер крокового двигуна.

Крок різьбового валу SFU12[3] – 4 мм, кількість кроків двигуна на оберт – 200, режим ділення кроку – 1/16. Отже переміщення на 1 імпульс:

$$\frac{4000 \text{ мкм}}{200 \text{ кроків} \cdot 16} \approx 1.455 \text{ мкм}$$

Це максимально теоретична точність позиціонування рухомого захвату для нашого двигуна та різьбового гвинта. Реальна точність все буде меншою, через деформації самої конструкції, деформації тензодатчика, а також інших факторів.

Підбір крокового двигуна за потужністю здійснювався з міркувань забезпечення крутного моменту, необхідного для створення поздовжньої сили 200 Н на різьбовому валу. За формулою знаходимо кут нахилу різьбової лінії:

$$\varphi = \arctg \frac{Pz}{\pi d} = \arctg \frac{4 \cdot 3}{3.14 \cdot 12} \approx 17.7^\circ,$$

де $P = 4$ мм – крок різьби; $z = 3$ – кількість заходів різьби; $d = 12$ мм – діаметр різьбового валу. Необхідний крутний момент розраховується за формулою

$$M = 0.5dF_{max}tg\varphi = 0.5 \cdot 0.12 \cdot 200 \cdot tg17.7^\circ \approx 38 \text{ Н}\cdot\text{см}.$$

Згідно отриманого крутного моменту підбираємо кроковий двигун Nema23 23HS0601 з крутним моментом на валу 40 Н·см.

Принципова електронна схема приладу (рис. 3) складається з кількох модулів. Основою є плата Arduino Nano. Для обробки сигналів з тензодатчика необхідний модуль HX711. Для індикації процесу та результатів експерименту використано рідкокристалічний символічний дисплей 1602 з адаптером шини I2C.

Для керування кроковим двигуном вибрано драйвер A4988 з максимальним струмом на фазу 2А за умови встановлення радіатора на мікросхему.

Слід врахувати, що в драйверах A4988 заборонено відключати кабель двигуна при наявності живлення. Мікросхема драйвера згорає практично в 95% випадках.

Дисплей і модуль HX711 підключені на шину I2C (виводи A4 і A5 Arduino). Для керування випробувальною установкою використано 3 кнопки (вгору, вниз, стоп). Крім того, в установці є два вимикачі, які спрацьовують в крайніх положеннях рухомої частини з захватом. Для регулювання швидкості переміщення рухомого захвату використано змінний резистор, підключений до аналогового входу A0. Керування машиною також можливе і через USB за допомогою розробленої програми.

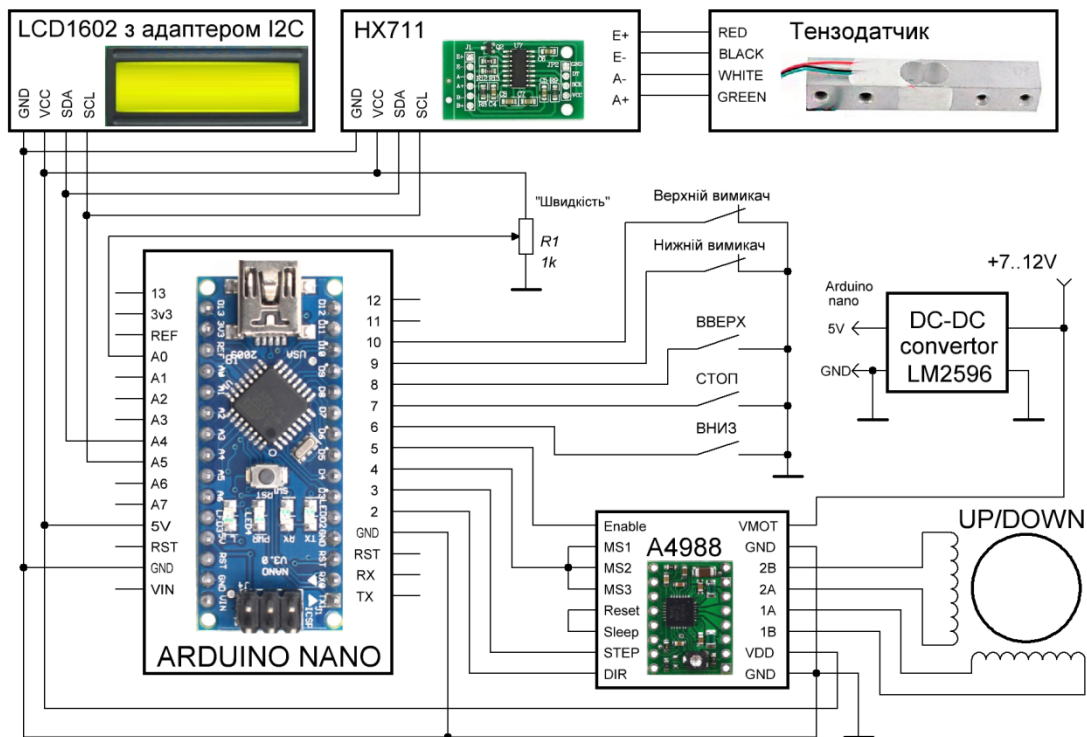


Рис. 3. Принципова схема

Програмне забезпечення для Arduino Nano написано в середовищі Arduino IDE та містить модулі коду для рідкокристалічного дисплея 1602, модуля HX711, драйвера крокового двигуна та обробки команд з кнопок та кінцевих вимикачів.

Керування драйвером двигуна відбувається за допомогою переривання Timer1 по співпаданню з регістром

```
ISR(TIMER1_COMPA_vect)
{
    if (MotorStarted)
    {
        digitalWrite(3,!digitalRead(3));
        if (FF) len=len+0.00125;
        if (BF) len=len-0.00125;
    }
}
```

}

Коефіцієнт 0.00125 – це переміщення рухомої частини в міліметрах на один імпульс, який надходить на драйвер двигуна.

Такий підхід дозволяє розвантажити основну функцію loop() та забезпечити стабільну швидкість зміни навантаження. Крім того, змінюючи регістр OCR1A, можна змінювати швидкість переміщення. Для цього на аналоговий вхід A7 підключено потенціометр, напруга на якому і визначає регістр OCR1A.

```
Speed=analogRead(A7)/10+1;
Vspeed=10.0/Speed;
cli(); // вимкнути глобальні переривання
OCR1A = Speed;
TCNT1=0;
sei(); // ввімкнути глобальні переривання
```

Змінна Vspeed містить значення швидкості в мм/с і призначена для виводу на дисплей та на ПК.

Варто відмітити, що найвищий пріоритет при роботі випробувальної установки мають кінцеві вимикачі, потім кнопки на передній панелі, і лише потім команди з ПК. Так, при спрацьовуванні верхнього кінцевого вимикача контролер зупинить рух вгору і не буде відкликатись на натискання кнопки «Вгору» та відповідну команду з ПК.

```
if ((digitalRead(8)==0)||((Buf=='u')) if (digitalRead(10)) //перемкнуємо мотор на рух вгору
якщо натиснена кнопка та рама не в крайньому верхньому положенні
```

Єдиний виняток – команда СТОП, яка зупинить машину як з програми, так і натисненням кнопки на передній панелі.

Установка має режим автокалібрування тензодатчика. Для цього необхідно виставити мінімально можливу швидкість (регулятор швидкості до упору проти годинникової стрілки) та затиснути кнопку «СТОП» на кілька секунд. При цьому значення з тензодатчика запам'ятується і буде вважатись як нульове.

```
//функція калібрування. По довгому натисненню кнопки "Стоп" при мінімальній швидкості
if ((digitalRead(7)==0)&&(Speed>100))
{
    offset_count++;
    delay(10);
}
else offset_count=0;
if (offset_count>10) Calibration(); //виклик функції калібрування
// кінець виклику калібрування
```

При натисканні кнопки "Стоп" установка повинна утримувати зразок при заданому навантаженні. Проте, якщо це не потрібно, то затиснувши кнопку на 1 секунду, можна вимкнути драйвер двигуна. На дисплеї в нижньому правому куті замість символів "M1" з'являться символи "M0".

```
//функція вимкнення драйверу (вимикаємо подачу напруги на мотор)
if ((digitalRead(7)==0) && (MotorStoped=1))
{
    motor_stop_count++;
    delay(10);
}
else motor_stop_count=0;
if (motor_stop_count>5) digitalWrite(5,HIGH); //Motor disable
```

На рис. 4 наведено вигляд дисплею установки для різних режимів роботи.



Рис. 4. Дисплей випробувальної установки при різних режимах роботи: (зліва направо: калібрування тензодатчика, результат калібрування, стиск зразка)

Програмне забезпечення для ПК написано в середовищі Lazarus і містить інтуїтивний інтерфейс для керування випробувальною машиною та має інструменти побудови графічних залежностей зміни характеристик навантажування, переміщення, деформування тощо. Доступні також функції автоматичної обробки графіків, задання програми циклічних навантажень, наявна база даних характеристик найбільш поширених матеріалів, збереження даних в Excel та багато інших. Скріншот програми представлено на рисунку 5.

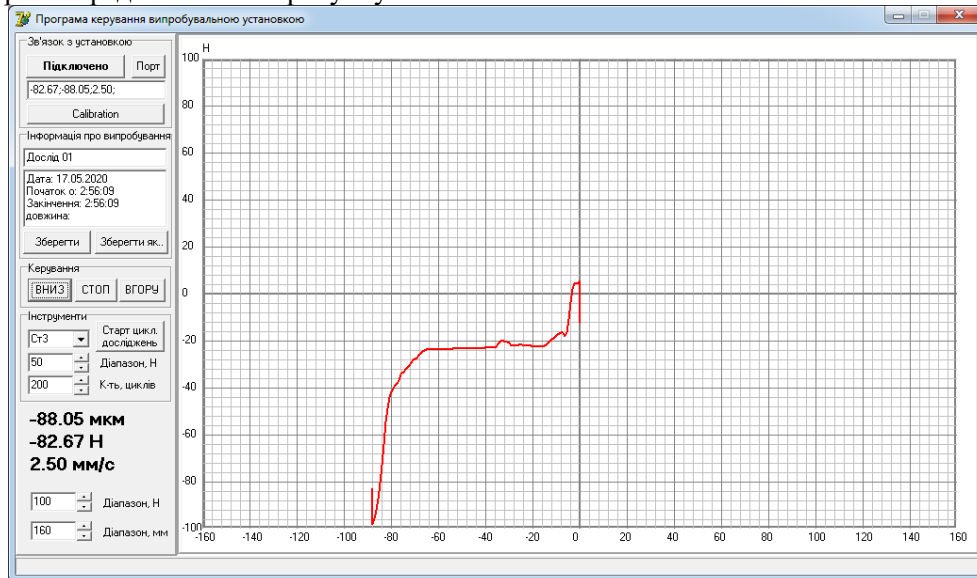


Рис. 5. Діаграма стиску тестового зразка (кубик пінополістиролу)

Висновки та практичне застосування. Розроблено компактну та недорогу випробувальну установку. Апробація випробувальної установки показала, що вона дозволяє проводити статичні випробування матеріалів та може використовуватись з навчально-демонстраційною метою під час викладання уроків фізики в школі, курсів механіки, опору матеріалів, теорії пружності, тощо у ЗВО. Собівартість (без врахування витрат часу на проектування та виготовлення дослідного екземпляру) склала 1200-1300 грн., що значно менше промислових аналогів з подібною функціональністю (до кількох десятків тисяч грн.).

Список бібліографічних посилань.

1. Документація на модуль HX711 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/docs/hx711.pdf>
2. Tabletop Material Testing Instruments [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.aandd.jp/products/test_measuring/stb/stb.html
3. SFU1204 Ball ScrewKit. Dataspecs. URL: <https://www.handsontec.com/dataspecs/linearmotion/SFU1204-BallScrew-Kit.pdf> (дата звернення: 15.05.2020)
4. Сайт arduino.ua, сторінка тензодатчика 20kg [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://arduino.ua/prod1977-datchik-vesa-tenzodatchik-20-kg>
5. DSTU 2824-94 Розрахунки та випробування на міцність. Види і методи механічних випробувань. Терміни та визначення
6. DSTU EN 10002-1:2006 Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN 10002-1:2001, IDT)
7. DSTU EN 636:2014 Фанера. Технічні умови (EN 636:2003, IDT) [Чинний від 21.11.2014]. Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс" (УкрНДІ "Ресурс"), 2014. 16 с.
8. Czichos, Horst Springer Handbook of Materials Measurement Methods. Berlin: Springer. 2006, pp. 1206 p.. - ISBN 9783540207856.

References

1. HX711 Datasheet [URL]: <https://arduino.ua/docs/hx711.pdf> (date of application: 15.05.2020)
2. Tabletop Material Testing Instruments [URL]: https://www.aandd.jp/products/test_measuring/stb/stb.html (date of application: 15.05.2020)
3. SFU1204 Ball ScrewKit. Dataspecs. [URL]: <https://www.handsontec.com/dataspecs/linearmotion/SFU1204-BallScrew-Kit.pdf> (date of application: 15.05.2020) (date of application: 15.05.2020)
4. Arduino.ua Site, loadcells 200N page [URL]: <https://arduino.ua/prod1977-datchik-vesa-tenzodatchik-20-kg>
5. DSTU 2824-94 Calculations and strength tests. Types and methods of mechanical tests. Terms and definitions
6. DSTU EN 10002-1: 2006 Metallic materials. Tensile tests. Part 1. Test method at room temperature (EN 10002-1: 2001, IDT)
- DSTU EN 636: 2014 Plywood. Technical conditions (EN 636: 2003, IDT) [Effective from 21.11.2014]. Ukrainian State Research Institute "Resource" (UkrNDI "Resource"), 2014. 16 p. Czichos, Horst Springer Handbook of Materials Measurement Methods. Berlin: Springer. 2006, pp. 1206 p.. - ISBN 9783540207856