

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв

Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П.

Дослідження жорсткості пружних елементів мехатронних систем

Методичні вказівки до лабораторної роботи
з курсу «Приводи та автоматика мехатронних систем»
для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Тернопіль
2025

Методичні вказівки розроблено у відповідності з навчальним планом підготовки здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

Укладачі: к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.;
ст. викладач Шовкун О.П.

Рецензент: к.т.н., доцент Сенчишин В.С.

Відповідальний за випуск: к.т.н., доцент Капаціла Ю.Б.

Розглянуто та схвалено на засіданні кафедри автоматизації технологічних процесів і виробництв (протокол №1 від 28 серпня 2025 року).

Затверджено та рекомендовано до друку науково-методичною комісією факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії ТНТУ (протокол № 1 від 29 серпня 2025 року).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Основні теоретичні положення	5
2 Опис конструкції автоматизованого лабораторного стенду для тестування пружин	10
3. Послідовність виконання роботи	15
4 Зміст звіту	16
5 Питання для самоконтролю	17
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	18

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості неможливий без широкого впровадження систем автоматизації, які забезпечують підвищення продуктивності, якості продукції, енергоефективності та безпеки виробництва. Автоматизація є ключовим фактором у реалізації концепції Індустрії 4.0, яка передбачає інтеграцію фізичних виробничих процесів з цифровими технологіями, штучним інтелектом та Інтернетом речей.

Метою цієї лабораторної роботи є визначення жорсткості циліндричних пружин стиснення за допомогою автоматизованого лабораторного стенду.

Виконання лабораторної роботи сприяє формуванню в студента таких компетентностей:

- здатність застосовувати знання фізики, електротехніки, електроніки і мікропроцесорної техніки, в обсязі, необхідному для розуміння процесів в системах автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологіях;
- здатність обґрунтовувати вибір технічних засобів автоматизації на основі розуміння принципів їх роботи аналізу їх властивостей, призначення і технічних характеристик з урахуванням вимог до системи автоматизації і експлуатаційних умов; налагоджувати технічні засоби автоматизації та системи керування;
- здатність обґрунтовувати вибір структури систем автоматики, засобів автоматики та мікропроцесорних систем управління.

При виконанні лабораторної роботи необхідно дотримуватись вимог техніки безпеки, зокрема «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів», виконувати роботу лише з дозволу викладача та під його контролем, дотримуватись порядку та чистоти на робочому місці, виконувати тільки ті дії, які передбачені методикою роботи. У разі несправності або аварійної ситуації негайно вимкнути обладнання та повідомити викладача.

Тема. Визначення характеристик циліндричних пружин.

Мета роботи: ознайомлення з призначенням, конструктивними особливостями, сферою застосування циліндричних пружин, набуття практичних навиків з визначення основних характеристик пружин.

1 Основні теоретичні положення

Пружини в мехатронних системах відіграють важливу роль, оскільки забезпечують зберігання, передачу або регулювання механічної енергії.

Вони можуть виконувати кілька функцій у різних автоматизованих системах, зокрема:

- акумуляція енергії: пружини зберігають механічну енергію та вивільняють її при необхідності, наприклад, для повернення деталі у вихідне положення після спрацювання актуатора;
- гасіння вібрацій і ударів: системах автоматизації, де виникають динамічні навантаження, пружини можуть слугувати демпферами – поглинають або компенсують удари, коливання та вібрації;
- сила зворотної дії: у виконавчих механізмах (пневматичних, гідравлічних, електромеханічних) пружини часто використовуються для забезпечення зворотного ходу або стабілізації положення;
- контактний тиск: а контактах реле, кнопках, вимикачах, та інших елементах керування пружини забезпечують необхідний контактний тиск або повернення до початкового стану;
- навантаження та компенсація: в автоматичних пристроях пружини можуть служити для компенсації змін навантаження або температурного розширення.

Приклади використання:

- соленоїди з пружиною повернення – для автоматичного відключення;

- пружинні муфти – для передачі моменту з компенсацією перекосів;
- пружинні датчики (сенсори) – де вимірювання базується на деформації пружини;
- пневматичні клапани з пружинним поверненням – для безпечного закриття в разі втрати тиску.

Існує декілька видів пружин:

- пружини стиснення – призначені для опору осьовому стиску та найчастіше використовуються для протидії силам.
- пружини розтягування – працюють, накопичуючи енергію при розтягуванні та вивільняючи її при знятті натягу.
- пружини постійного зусилля – забезпечують майже рівномірне зусилля по всьому розтягуванню, на відміну від традиційних гвинтових пружин, навантаження яких змінюється.
- торсійні пружини – застосовують крутний момент або обертальну силу та найчастіше використовуються у вузлах, що потребують шарнірного руху.

Вибір правильного типу залежить від необхідного навантаження, обмеженого простору, умов експлуатації та терміну служби.

Пружинні механізми можна використовувати в різних системах, від платформ мікроскладання до великих промислових роботів.

Вибір матеріалу пружини безпосередньо впливає на роботу пружинних механізмів, особливо у складних виробничих умовах. Окрім характеристик продуктивності, на кінцеву продуктивність також впливатимуть довговічність та фактори навколишнього середовища, яким піддаватиметься пристрій.

Нержавіюча сталь є найпоширенішим матеріалом завдяки своїй стійкості до корозії та міцності, що робить її придатною для чистих приміщень, ліній харчового виробництва або зовнішніх установок. Для високоциклових операцій або систем, що піддаються впливу тепла, можуть знадобитися втомостійкі сплави, такі як інконель (нікель-хромовий жароміцний сплав) або високовуглецевий пружинний дріт з фосфатним покриттям.

Покриття та обробка поверхні також можуть відігравати певну роль у продовженні терміну служби та покращенні продуктивності. Цинкове покриття, чорне оксидування та порошкове покриття можуть захистити пружини від зношення внаслідок впливу навколишнього середовища та зменшити тертя в рухомих вузлах.

Зрештою, правильний вибір матеріалів буде необхідним для забезпечення надійності при повторюваних навантаженнях, мінімізації поломок та витрат на заміну.

Пружини також допомагають компенсувати невеликі відхилення в розмірах деталей. Таке поглинання допусків допомагає зменшити потребу в жорстких допусках у початкових процесах, що може знизити загальні витрати. Це простий спосіб забезпечити безперебійну роботу всієї системи без надмірного інженерного оздоблення.

Одна з найбільших переваг пружинних механізмів полягає в швидкості їх реакції, оскільки немає затримки – пружина повертається у вихідне положення, щойно знімається зусилля, яке до неї прикладене.

Ефективність сучасного виробничого устаткування значною мірою залежать від модульності. Незалежно від того, чи використовується швидкозмінний інструмент, чи роботизовані комірки, пружинні компоненти допомагають спростити налаштування та демонтаж.

Наприклад, у затискних системах пружинні затискачі можуть фіксуватися на місці без ручного затягування.

У поєднанні з пневматичним або електричним приводом вони пропонують гібридну конфігурацію – швидкий, потужний рух від приводу, підкріплений надійністю та простотою пружини для повернення системи до положення за замовчуванням або утримання.

Ці компоненти також поширені в конвеєрних системах, індексних столах, схватах і системах запобіжного блокування.

Зі зростанням складності систем мінімізація точок відмови стає важливішою. Пружинні механізми пропонують пасивний спосіб підтримки

контролю руху без збільшення навантаження на ПЛК, контролери двигунів або датчики. Наприклад, пружинний привід автоматично повертає інструмент у початкове положення, не чекаючи на керуючий сигнал. Фіксаторний механізм може забезпечувати тактильний зворотний зв'язок або фізичні зупинки без необхідності електронного контролю.

Така незалежність від активного керування робить пружинні компоненти цінними в критично важливих для безпеки операціях, оскільки дозволяє їм продовжувати функціонувати під час відключення електроенергії або аварійних зупинок. Пружини також зменшують навантаження на пневматичні або електричні системи, що додатково може сприяти економії енергії.

Використання пружинних компонентів забезпечує надійну, енергоефективну та зручну для оператора систему, яка може працювати відповідно до необхідних умов.

Навіть попри те, що автоматизація продовжує розвиватися, пружинні пристрої залишаються важливими. Вони забезпечують зусилля, скидають рух і підтримують вирівнювання без програмування чи зовнішнього втручання.

Характеристики пружин визначають їх механічні властивості та сферу застосування. Основними з них є:

- жорсткість (жорсткість пружини, коефіцієнт пружності) – показує, яку силу потрібно прикласти для зміщення пружини на одиницю довжини, вимірюється в Н/м (ньютон на метр);
- граничне навантаження – максимальне навантаження, яке може витримати пружина без залишкової деформації чи руйнування;
- діапазон деформації (робочий хід) – діапазон змін довжини пружини при допустимому навантаженні;
- модуль пружності (модуль Юнга) – характеристика матеріалу, з якого виготовлена пружина;
- гістерезис – різниця між енергією, витраченою на стиснення (розтягування) пружини, та енергією, яку вона віддає при поверненні у вихідне положення;

- матеріал – впливає на пружність, довговічність, корозійну стійкість (наприклад, сталь, бронза, нержавіюча сталь);
- тип пружини – спіральна (циліндрична, конічна), пластинчаста, торсійна, тарілчаста тощо;
- розміри – довжина, діаметр дроту, зовнішній і внутрішній діаметри, кількість витків.

Основні геометричні параметри циліндричної пружини стиску зображені на рисунку. 1.

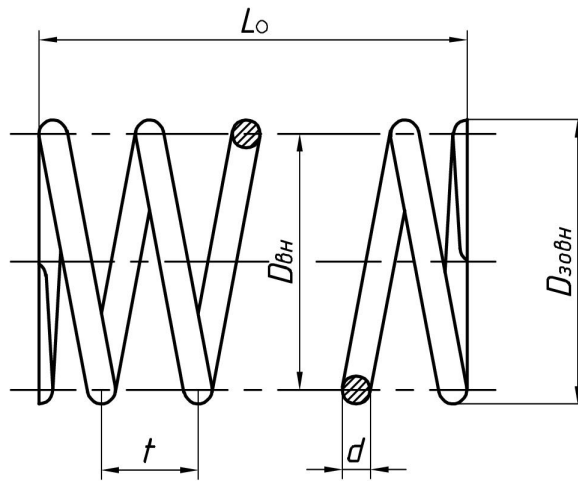


Рисунок 1 – Основні геометричні параметри циліндричних пружин стиснення:

d – діаметр дроту, з якого навита пружина; $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр пружини;

$d_{\text{зовн}}$ – зовнішній діаметр пружини; L_0 – довжина пружини; h – крок

Більшість пружин, що не зазнають деформацій за межею пружності, описуються законом Гука, згідно з яким прикладена сила прямо пропорційна лінійному видовженню пружини відносно рівноважного положення:

$$F = -kx, \quad (1)$$

де x – вектор зміщення: відстань і напрям деформації пружини;

F – результуючий вектор сили: величина і напрям зусилля, спрямованого на

повернення пружини до стану рівноваги;

k – коефіцієнт жорсткості пружини (константа пружини).

Коефіцієнт жорсткості пружини визначають за залежністю:

$$k = \frac{Gd^4}{8D^3n}, \quad (2)$$

де G – модуль зсуву, залежить від матеріалу пружини;

d – діаметр дроту, з якого навита пружина;

D – діаметр пружини;

n – кількість витків пружини.

Розрахунок пружин передбачає розрахунок геометрії, визначення жорсткості і осадки, максимальних напружень, маси і енергоємності, перевірку міцності і стійкості. В наш час існує дуже багато прикладного програмного забезпечення і online сервісів, які дозволяють виконати проектний розрахунок пружин. Всі вони базуються на класичних методиках розрахунку. Втім, розрахунок пружин в більшості випадків потрібний власне виробникам пружин, а перед розробниками систем автоматизації стоїть задача підбору пружин для заданих умов експлуатації і перевірка пружин на відповідність заявленим характеристикам. І якщо більшість геометричних параметрів можна виміряти за допомогою стандартних вимірювальних засобів, то для вимірювання зусилля пружини необхідне спеціальне устаткування. Один з варіантів такого виду обладнання буде використано в ході виконання цієї лабораторної роботи.

2 Опис конструкції автоматизованого лабораторного стенду для тестування пружин

Автоматизований лабораторний стенд призначений для визначення зусилля пружини та її залежності від деформації. Будова стенду для тестування

пружи́н зображена на рисунку 2.

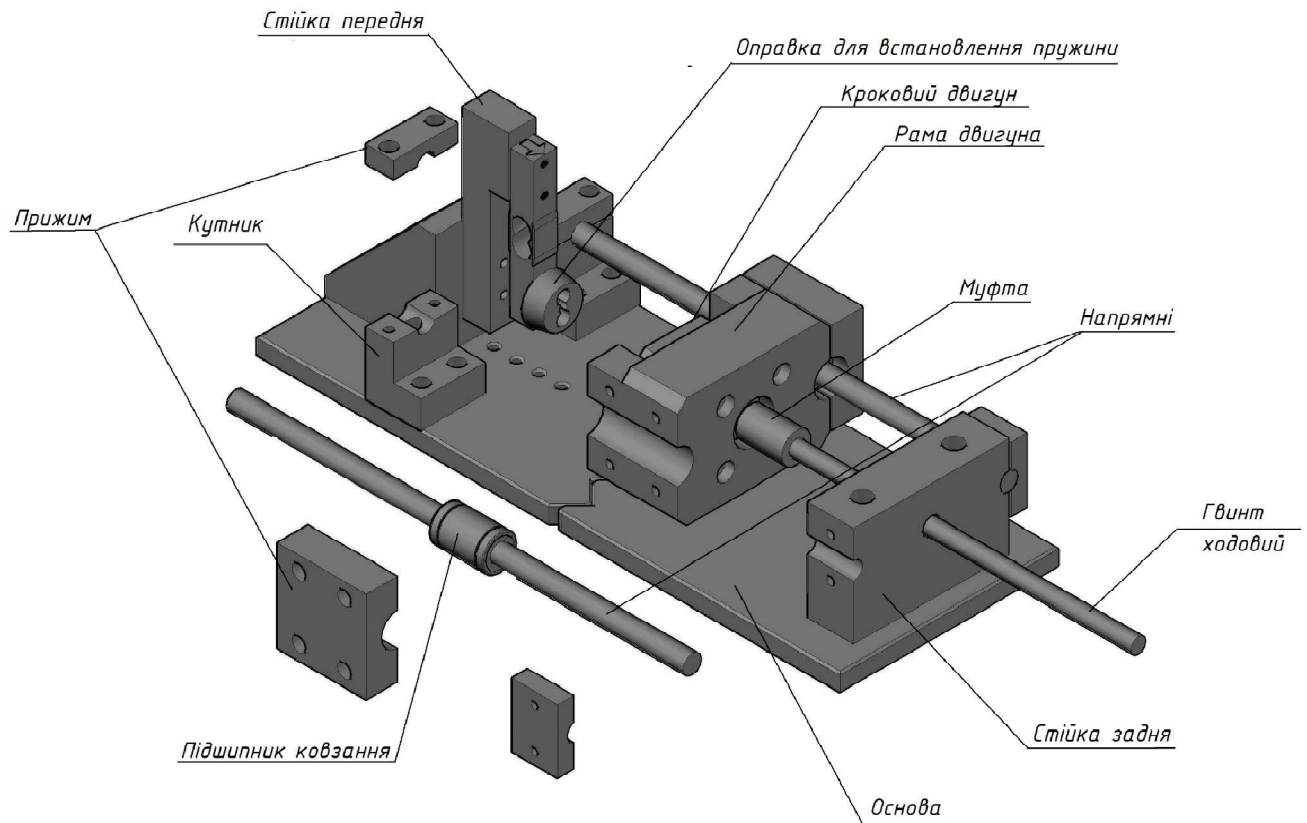


Рисунок 2 – Конструкція автоматизованого лабораторного стенду для тестування пружин стиснення

Лабораторний стенд складається з основи, на якій розташовані кутник для кріплення напрямних, передня стійка, на якій закріплено тензодавач і задня, до якої кріпляться інші кінці напрямних і в якій закріплена спеціальна гайка. По напрямних рухається рама з кроковим двигуном NEMA17. Для зменшення тертя в рамі встановлені підшипники ковзання, через які проходять напрямні. Вал крокового двигуна через муфту з'єднаний з ходовим гвинтом M8. Вільний кінець ходового гвинта знаходиться в зачепленні з гайкою, закріпленою в одному з задній стійці. Обертання вала двигуна приводить до лінійного переміщення рами і створення зусилля, яке стискає пружину. Об'єкт контролю – пружина, встановлюється одним кінцем на оправку, а другий впирається в корпус двигуна.

Вимірювальне зусилля сприймається тензодавачем. Сигнал з тензодавача підсилюється, перетворюється в цифровий вигляд і передається до

мікроконтролера для подальшої обробки.

В конструкції лабораторного стенда використані такі стандартні комплектуючі:

- тензодавач;
- кроковий двигун NEMA17;
- муфта 5 мм – 8 мм;
- ходовий гвинт M8;
- хромовані загартовані напрямні Ø10 мм;
- лінійні підшипники ковзання LM10UU;
- болти M3.

Структурна схема стенда включає основні апаратні блоки системи і зображена на рисунку 3.



Рисунок 3 – Структурна схема автоматизованої системи тестування пружин

Функціональна схема описує логіку роботи стенда і зображена на рис. 4.

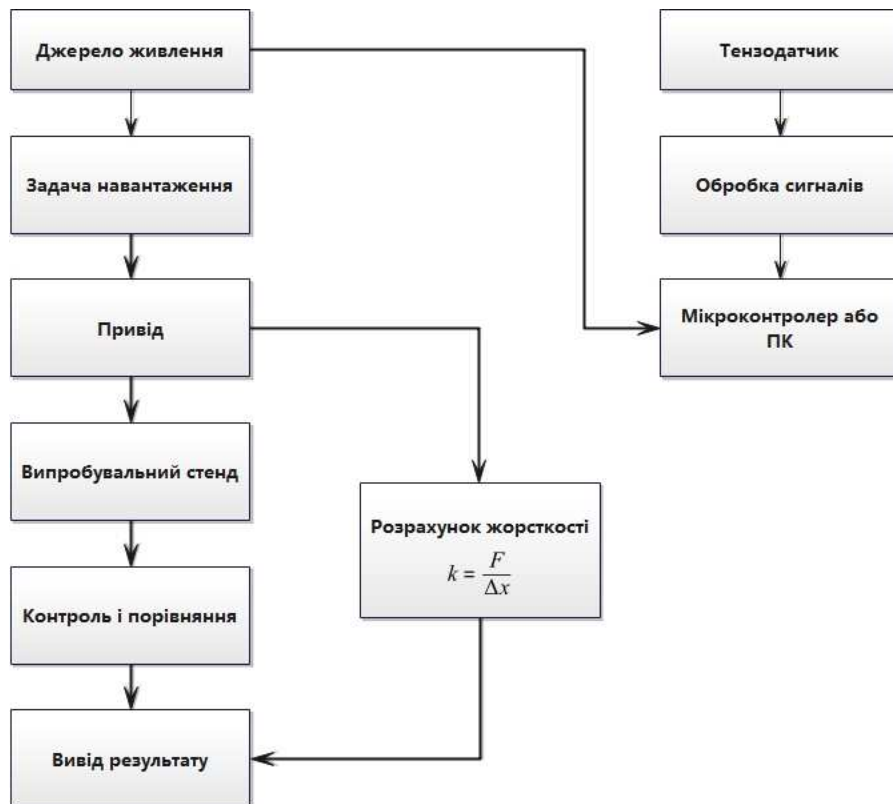


Рисунок 4 – Функціональна схема стенда

Згідно функціональної схеми реалізується певна послідовність функціонування основних компонентів автоматизованої системи тестування пружин. Ця послідовність складається з таких етапів.

- 1 Задача навантаження: привід передає зусилля навантаження на пружину.
- 2 Вимірювання сили: тензодавач вимірює навантаження, прикладене до пружини;
- 3 Вимірювання деформації (ходу): датчик переміщення фіксує зміну довжини пружини.
- 4 Обробка сигналів: обидва сигнали (зусилля та хід) подаються через АЦП на мікроконтролер або комп'ютер;
- 5 Розрахунок жорсткості: програма розраховує жорсткість $k = F / \Delta x$.
- 6 Вивід результатів: результати можуть зберігатися в файл, використовуватися для побудови графіків і виводитися на друк.

Схема керування станом (рисунок 5) забезпечує управління роботою крокового двигуна, збирання даних від тензодатчика і їх передачу до персонального комп'ютера для оброблення.

Основним елементом системи керування є мікроконтролер Arduino Nano, в Для керування двигуном використовується драйвер крокового двигуна A4988, а для вимірювання зусилля використано тензодавач з чотирма тензорезисторами, з'єднаними за мостовою схемою. Для підсилення сигналу тензодавача і його перетворення в цифровий вигляд використовується зовнішній модуль АЦП на базі мікросхеми HX711. В якості елемента ручного керування використовується джойстик – двоосьовий потенціометр з пружинним поверненням моделі KY-023, який складається з двох змінних резисторів та кнопки.

Живлення системи здійснюється від однополярного стабілізованого джерела 5В 1А. Для живлення двигуна передбачено джерело живлення 12В 2А.

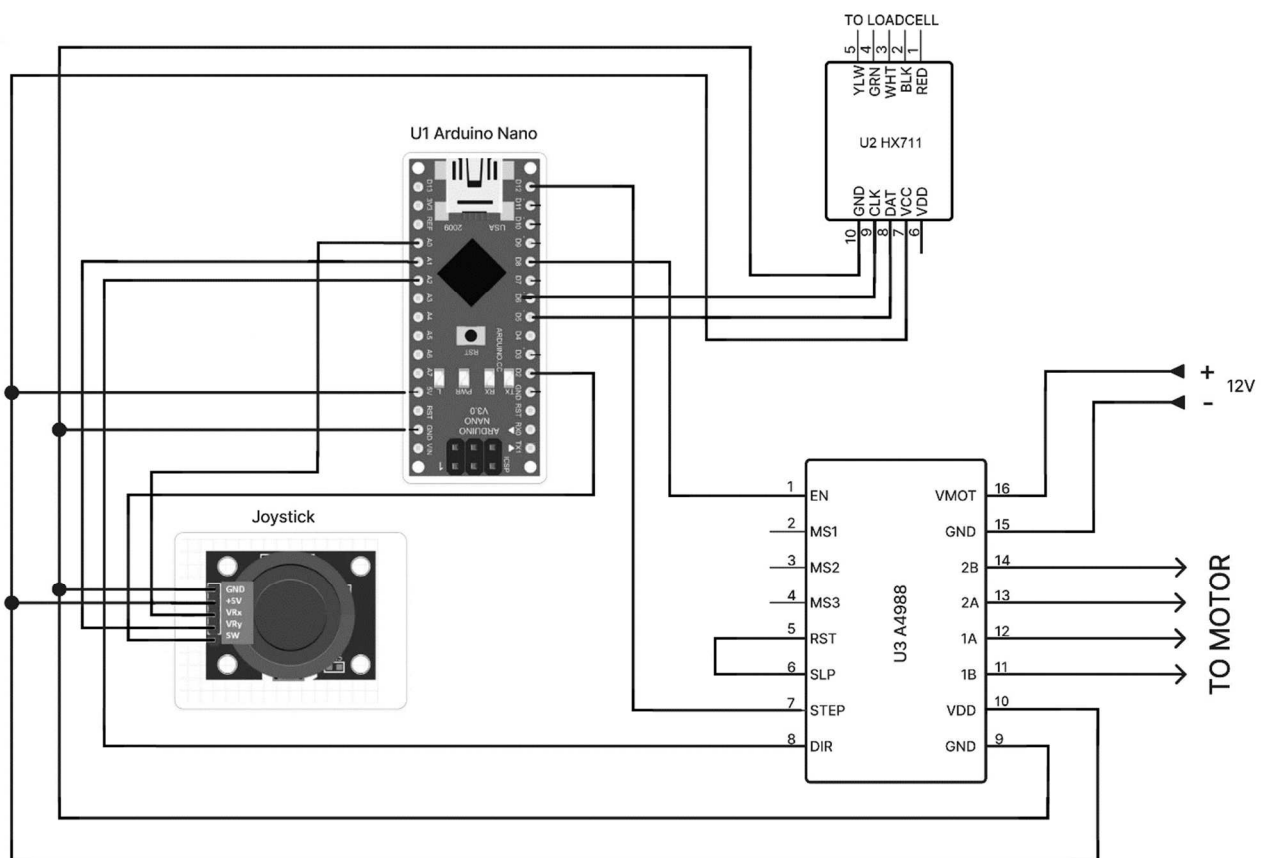


Рисунок 5 – Схема системи керування

3. Послідовність виконання роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями до лабораторної роботи та послідовністю виконання роботи.
2. Ознайомитися з будовою лабораторного стенда.
3. Отримати завдання на лабораторну роботу та допуск до виконання.
4. Перевірити робоче місце на відсутність сторонніх предметів.
5. Увімкнути персональний комп'ютер і живлення стенда.
6. Під'єднати кабель USB до відповідного гнізда комп'ютера, в диспетчері пристроїв ОС Windows визначити, до якого COM-порта виконано підключення.
7. Встановити пружину між опорами, які розташовані на тензодатчику і задній поверхні двигуна.
8. За допомогою джойстика перемістити каретку до моменту закріплення пружини.
9. Запустити програму «Importseri12.exe», у вікні, що відкрилося запустити команду, ввести номер порта, який було визначено в диспетчері пристроїв, наприклад, com2.
10. У вікні програми набрати команду «start» (без лапок).
11. Натиснути кнопку на джойстику, почнеться запис даних.
12. Нахилиючи ручку джойстика, привести в рух платформу з двигуном. В результаті пружина почне стискатися. Продовжувати переміщення до тих пір, поки витки пружини не почнуть торкатися один одного.
13. Після досягнення максимального стиснення пружини відпустити ручку джойстика і у вікні програмі набрати команду «stop». В результаті в папці програми буде створено файл Excel з результатами вимірювань.
14. За допомогою джойстика відвести каретку в вихідне положення, звільнити пружину, вимкнути живлення і від'єднати USB-кабель.
15. На основі експериментальних даних побудувати графік залежності сили F від деформації x .

16. За лінійною ділянкою графіка визначити коефіцієнт жорсткості пружини як кутовий коефіцієнт прямої: $k = \Delta F / \Delta x$.
17. Обчислити середнє значення коефіцієнта жорсткості за результатами декількох вимірювань.
18. Оцінити абсолютну та відносну похибки вимірювання.
19. Зробити висновок щодо відповідності експериментальних результатів теоретичним положенням закону Гука.
20. За допомогою штангенциркуля провести вимірювання геометричних параметрів пружини.
21. Визначити довжину пружини в розгорнутому вигляді за формулою:

$$L = n \sqrt{[\pi(D - d)]^2 + t^2}, \quad (3)$$

де n – кількість витків пружини;

D – зовнішній діаметр пружини, мм;

d – діаметр дроту, мм;

t – крок пружини, мм.

22. Виконати робоче креслення пружини. Приклад оформлення наведено в додатку А.
23. Оформити звіт з роботи.

4 Зміст звіту

1. Тема і мета роботи.
2. Послідовність виконання роботи.
3. Таблиця з результатами вимірювань.
4. Графік залежності сили пружності від видовження пружини.
5. Робоче креслення пружини.
6. Висновки.

5 Питання для самоконтролю

1. Призначення та сфера застосування пружин.
2. Матеріали, які використовуються для виготовлення пружин.
3. Основні характеристики пружин.
4. Сформулювати закон Гука та умови його застосування.
5. Яке призначення тензометричного датчика в лабораторній установці?
6. Які переваги має автоматизований метод вимірювання?
7. Як визначається коефіцієнт жорсткості пружини за експериментальними даними?
8. Які основні джерела похибок під час виконання роботи?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- 1 Біляковський І.Є. Електромехатронні перетворювачі систем автоматики. Львів.: Магнолія. 2024. 155 с.
- 2 Васильківський І. С., Фединець В. О., Юсик Я. П. Виконавчі пристрої систем автоматизації. Львів: Львівська політехніка, 2020. 220 с.
- 3 Глухов О.В., Кравчук О.О., Левченко Є.В. Вивчення властивостей мікроконтролерів і електронних систем на базі платформи Ардуіно: навч. посібник для студентів ВНЗ. Харків: ХНУРЕ, 2019. 192 с.
- 4 Лушніков В.М., Чайковський О.Б., Кравченко О.Ю. Дослідження характеристик гвинтових пружин. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. 2012. Вип. 12, ч. 1. С. 318, 319.
- 5 Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. 324 с.
- 6 Проць Я.І. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
- 7 Роганов Л.Л., Карнаух С.Г. Розрахунок пружин, ресор та пружних амортизаторів. Краматорськ. ДДМА. 2000. 112 с.
- 8 Калькулятор пружин. URL: <https://express-springs.com/calculator-compression> (дата звернення: 23.02.2025).
- 9 Основний посібник із різних типів пружин та їх застосування. URL: <https://etcnminchining.com/uk/blog/types-of-springs> (дата звернення: 23.02.2025).

