

М. О. РИБАЛЬЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-5162-5201

О. Ю. ПОТАП

кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-8643-0228

І. О. МАНАЧИН

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-9795-6751

О. П. ЄГОРОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0002-9867-0437

ДИСТАНЦІЙНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КРОКОВИМ ДВИГУНОМ НАВЧАЛЬНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ ЛІНІЇ

Підготовка магістрів з автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки вимагає формування у майбутніх фахівців базових компетентностей щодо здатності здійснювати автоматизацію складних технологічних об'єктів та комплексів, створювати кіберфізичні системи на основі інтелектуальних методів управління та цифрових технологій з використанням робототехнічних та інтелектуальних мехатронних пристроїв. Матеріальне, інформаційне та методичне забезпечення такої підготовки стає наразі актуальною задачею українських технічних університетів, які активно розгортають на своїй базі нові лабораторні робототехнічні комплекси. Одним з найбільш поширених компонентів цих комплексів є крокові двигуни, що успішно застосовуються у різноманітному промисловому і спеціальному обладнанні для високоточного переміщення об'єктів на задану відстань. Зрозумілою умовою максимально повної реалізації переваг крокового двигуна як виконавчого механізму роботизованої системи є коректний підхід до проектування систем керування такими механізмами. В роботі ставилась задача розробки системи дистанційного керування кроковим двигуном навчальної транспортної лінії кафедри автоматизації виробничих процесів Українського державного університету науки і технологій. Кроковий двигун у свою чергу забезпечує переміщення каретки у задану позицію. Метою роботи було розробити бюджетну та дієву систему керування кроковим двигуном, що дозволить динамічно змінювати параметри системи за допомогою персонального комп'ютера (ПК), передаючи відповідні команди у систему через СОМ-порт, або за допомогою планшету, передаючи відповідні команди у систему через Bluetooth. Така система може знайти застосування як у навчальному процесі для відпрацювання стандартних прийомів керування кроковими двигунами та навичок програмування мікроконтролерів, так і в промислових системах, які потребують керування положенням механізму з високою точністю.

Ключові слова: система, кроковий двигун, керування, переміщення, робототехнічний комплекс, мікроконтролер.

M. O. RYBALCHENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-5162-5201

O. YU. POTAP

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-8643-0228

I. O. MANACHYN

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-9795-6751

O. P. YEHOROV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation of Production Processes
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-9867-0437

REMOTE STEPPER MOTOR CONTROL SYSTEM OF THE TRAINING TRANSPORT LINE

Master's training in automation, computer-integrated technologies and robotics requires the formation of future specialists' basic competencies in the ability to automate complex technological objects and complexes, to create cyber-physical systems based on intelligent control methods and digital technologies using robotic and intelligent mechatronic devices. Material, informational and methodical provision of such training is currently becoming an urgent task of Ukrainian technical universities, which are actively deploying new laboratory robotic complexes on their base. One of the most common components of these complexes are stepper motors, which are successfully used in a variety of industrial and special equipment for high-precision movement of objects to a given distance. An understandable condition for the maximally complete implementation of the advantages of a stepper motor as an executive mechanism of a robotic system is a correct approach to the design of control systems for such mechanisms. The task of the work was to develop a system of remote control of the stepper motor of the educational transport line of the Department of Automation of Production Processes of the Ukrainian State University of Science and Technology. The stepper motor, in turn, ensures the movement of the carriage to the given position. The aim of the work was to develop a budget and effective stepper motor control system that would allow dynamically changing system parameters using a personal computer (PC) by sending appropriate commands to the system via the COM port, or using a tablet by sending appropriate commands to the system via Bluetooth. Such a system can be used both in the educational process to practice standard stepper motor control techniques and microcontroller programming skills, and in industrial systems that require high-precision mechanism position control.

Key words: system, stepper motor, control, movement, robotic complex, microcontroller.

Постановка проблеми

Підготовка магістрів з автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки вимагає формування у майбутніх фахівців базових компетентностей щодо здатності здійснювати автоматизацію складних технологічних об'єктів та комплексів, створювати кіберфізичні системи на основі інтелектуальних методів управління та цифрових технологій з використанням робототехнічних та інтелектуальних мехатронних пристроїв. Матеріальне, інформаційне та методичне забезпечення такої підготовки стає наразі актуальною задачею українських технічних університетів, які активно розгортають на своїй базі нові лабораторні робототехнічні комплекси. Одним з найбільш поширених компонентів цих комплексів є крокові двигуни, що успішно застосовуються у різноманітному промисловому і спеціальному обладнанні для високоточного переміщення об'єктів на задану відстань. Зрозумілою умовою максимально повної реалізації переваг крокового двигуна як виконавчого механізму роботизовано системи є коректний підхід до проектування систем керування такими механізмами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Крокові двигуни як пристрої, що перетворюють електричні імпульси в дискретні механічні переміщення, на відміну від сервоприводів, які обмежені кутом повороту в діапазоні від 0 до 180°, можуть обертатися безперервно, подібно двигуну постійного струму, забезпечуючи при цьому досяжність набагато більшого ступеня контролю

за рухом. Саме на це були спрямовані зусилля багатьох вітчизняних розробників відповідних автоматизованих систем для навчальних цілей.

Авторами роботи [1] запропоновано систему управління кроковим двигуном фірми Mistumi моделі M42SP-5A, яка містить драйвер, мікроконтролер моделі ATmega8, що генерує керуючі імпульси, та персональний комп'ютер (ПК), який забезпечує зручний інтерфейс керування кроковим двигуном та вибір режимів його роботи. Для зручності керування двигуном на мові програмування Delphi 7 була написана програма, що забезпечує вибір відповідного режиму роботи двигуна та задання необхідних параметрів: режиму роботи (повнокроковий, напівкроковий), швидкості обертання двигуна, кількості кроків, яку необхідно відпрацювати. Передача команди відбувається через COM-порт.

В роботі [2] запропоновано здійснювати динамічне зміння параметрів мікропроцесорної системи, побудованої з використанням крокового двигуна, за допомогою персонального комп'ютера, з якого відповідні команди передаються до системи через вибраний COM порт за протоколом UART.

Модель комп'ютерної системи, що дозволяє дистанційно керувати кроковим двигуном, який використовується в електронних замках в системах «Розумний дім» запропонована в роботі [3]. Представлена система містить такі основні компоненти: мікроконтролер Arduino Uno, біполярний кроковий двигун, драйвер L293D, LCD-дисплей для відображення інформації про стан електронного замку, Virtual terminal, який використовувався для моделювання роботи Bluetooth модуля та мобільного пристрою, з якого користувач відправляє сигнал для керування електронним замком. Дана комп'ютерна система має лише два основних режими роботи: перший – відчиняє електронний замок, другий – зачиняє. Користувач приєднується до Bluetooth-модуля комп'ютерної системи за допомогою свого мобільного пристрою та передає відповідний код до контролера Arduino Uno. Мікроконтролер у свою чергу відправляє керуючі сигнали на кроковий двигун. В розглянутій моделі, біполярний кроковий двигун працює у повнокроковому режимі, в якому ротор повертається на 90 градусів. Відповідно, електромеханічна частина виконуючого механізму відкриває механічний засув. Зачинення відбувається аналогічно.

Авторами [4] проаналізовано математичний опис крокових електроприводів та реалізована віддалена система керування кроковим електроприводом через Інтернет, розглянуте керування кареткою навчально-дослідницького стенду за допомогою крокового двигуна через TCP/IP мережу. Мікроконтролер Arduino Uno до комп'ютерної мережі може бути підключений за допомогою Ethernet Shield W5100 або модуля Wi-Fi ESP8266-12. Керування кареткою здійснюється віддалено через браузер. В даній роботі керування здійснюється наступним чином: одноразове натискання кнопки керування двигуном призводить до переміщення каретки ліворуч або праворуч залежно від натиснутої кнопки; подвійне натискання – до здійснення мікрокрокового режиму (800 кроків); третє натискання повертає каретку у вихідний стан.

Виконаний аналіз виявив, що управління кроковими двигунами здійснюється за допомогою мікропроцесорних систем, які, як правило, повинні дозволити динамічно змінювати параметри роботи крокового двигуна: швидкість обертання, напрям руху, величину кута повороту тощо. Очевидно, незважаючи на певну схожість розглянутих систем, застосування крокових двигунів у різних об'єктах потребує індивідуального підходу до розробки системи дистанційного керування ними та відповідного програмного забезпечення.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Таким чином, у роботі ставилась задача розробки системи дистанційного керування кроковим двигуном навчальної транспортної лінії. Кроковий двигун у свою чергу забезпечує переміщення каретки у задану позицію. Тому метою роботи було розробити бюджетну та дієву систему керування кроковим двигуном, що дозволить динамічно змінювати параметри системи за допомогою персонального комп'ютера (ПК), передаючи відповідні команди у систему через COM-порт, або за допомогою планшета, передаючи відповідні команди у систему через Bluetooth.

Викладення основного матеріалу дослідження

Загальний вигляд навчальної транспортної лінії приведено на рис. 1. Дана лабораторна установка реалізована на кафедрі автоматизації виробничих процесів Українського державного університету науки і технологій.



Рис. 1. Загальний вигляд навчальної транспортної лінії

- 1 – навчальна транспортна лінія, 2 – каретка, 3 – кінцеві вимикачі, 4 – кроковий двигун,
5 – блок живлення, 6 – драйвер крокового двигуна, 7 – мікропроцесорний контролер,
8 – персональний комп'ютер (ПК)

Завдання для крокового двигуна, а саме визначення кількості кроків для руху, швидкість та напрямок задається з ПК 8 (або планшета).

Кінцеві вимикачі (індуктивні датчики) 3 використовуються для контролю руху (позиції) каретки 2 навчальної транспортної лінії 1. Вони фіксують крайнє ліве та крайнє праве положення каретки. Для введення сигналів з кінцевих вимикачів у мікропроцесорний контролер 7 використовуються електромагнітні реле. Вони необхідні через різні рівні живлення кінцевих вимикачів та мікропроцесорного контролера 7. Тобто реле виконують функцію гальванічної розв'язки. Для керування кроковим двигуном 4 використовується драйвер крокового двигуна 6.

До складу навчальної транспортної лінії входить наступне обладнання:

- індуктивні датчики (кінцеві вимикачі) Omron;
- кроковий двигун FL57STH76-1006B;
- електромагнітні реле SRD-24VDC-SL-C;
- драйвер крокового двигуна TB5660.

Схема керування зібрана на основі плати Arduino Uno [5]. Arduino Uno – це пристрій на основі мікроконтролера ATmega328. Плата має 14 цифрових входів/виходів, 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для програмування (ICSP) та кнопка скидання. Для початку роботи з пристроєм достатньо підключити його до комп'ютера за допомогою кабелю USB.

До складу керуючої системи також входить Bluetooth Module HC-05 – модуль широкого застосування для з'єднання пристроїв через Bluetooth-підключення. Bluetooth модуль управляється за допомогою UART, тобто, по суті, є UART-to-Bluetooth перетворювачем.

Схема підключення компонентів системи представлена на рис. 2.

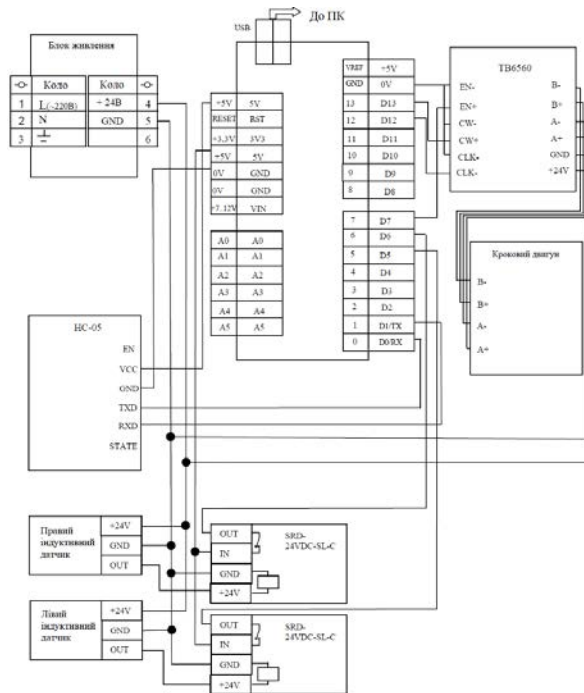


Рис. 2. Схема підключення

Одним з ключових етапів розробки системи управління є розробка програмного забезпечення.

Існують стандартні бібліотеки Arduino для керування кроковими двигунами. Такою є бібліотека Stepper, але у практичних додатках застосування цієї бібліотеки обмежене через підтримку лише повнокрокового режиму та використанню усіх обчислювальних ресурсів мікроконтролера, що призводить до «підвисання» програми. Є рішення краще – це використання бібліотеки AccelStepper. Ця бібліотека підтримує мікрокроковий режим, забезпечує прискорення та уповільнення, має можливість керувати декількома двигунами та ін.

Але використання цієї бібліотеки для навчальної транспортної лінії неможливе, оскільки керування кроковим двигуном повинно відбуватися з урахуванням стану індуктивних датчиків (кінцевих вимикачів). Тому потрібна розробка власної бібліотеки.

Була розроблена бібліотека DriverMotor . Її основні переваги:

- працює у паралельному процесі, не блокує виконання програми;

- перевіряє стан індуктивних датчиків та керує кроковим двигуном на підставі інформації від них;
 - підтримує кроковий, напівкроковий та мікрокроковий режими;
 - використовує мінімум ресурсів продуктивності мікроконтролера.
- Опис класу бібліотеки DriverMotor приведено на рис. 3.

```

1 #ifndef DriverMotor_h
2 #define DriverMotor_h
3 #include "Arduino.h"
4 class DriverMotor {
5
6 public:
7     DriverMotor(long number_of_steps, byte pinStep, byte pinDir, byte pinEn, byte pinLimit01, byte pinLimit02);
8     void control(); // керування, метод повинен викликатися регулярно з максимальною частотою комутації фаз
9     void motorStop();
10    void step(long steps); // ініціалізує поворот двигуна на задане число кроків
11    void findDivider(); // встановлює ділянку частоти для комутації фаз
12    void setSpeed(int speed); // встановлення швидкості
13    void setPosition();
14    long readSteps(); // читання кроків, які залишилися
15    long readAllSteps(); // читання загальної кількості кроків (визначення положення)
16 private:
17    long _number_of_steps; // число кроків (мікрокроків) на оберт
18    int _speed;
19    long _allSteps;
20    long _steps;
21    boolean _fixStop; // признак фіксовані положення при зупинці
22    unsigned int _divider; // ділянка частоти для комутації фаз
23    unsigned int _dividerCount; // лічильник ділянки частоти для комутації фаз
24    byte _pinLimit01, _pinLimit02;
25    byte _pinStep, _pinDir, _pinEn;
26    int _prevSteps;
27
28 };
29 #endif
    
```

Рис. 3. Опис заголовкового файлу DriverMotor.h

Після підключення файлів бібліотеки можна користуватися всіма відкритими методами та змінними створеного класу. Крім створеного класу, для керування роботою крокового двигуна знадобиться також бібліотека TimerOne. Бібліотека використовує таймер 1 контролера Arduino та дозволяє формувати переривання з періодом від 1 мкс до 8,4 сек. Дискретність встановлення часу – 1 мкс.

Отже, з використанням бібліотеки DriverMotor та TimerOne програма керування двигуном із введенням завдання по COM-порту, що написана із використанням середовища Arduino IDE має вигляд, що представлений на рис. 4. Такі програми прийнято називати скетчами.

```

//Програма драйвера крокового двигуна з керуванням від ком'ютера
#include <TimerOne.h>
#include <DriverMotor.h>
#define TIME_OUT 120 // час заборони між командами (10,01 мс)
#define NUMBER_OF_STEPS 3200 //Число кроків (мікрокроків) на оберт
#define step_pin 12 // До pin 12 підключено Steps pin
#define dir_pin 13 // До pin 13 підключено Direction pin
#define dir_en 7 // До pin 7 підключено Enable pin
#define Limit01 3 // До pin 10 підключено правий індуктивний датчик
#define Limit02 4 // До pin 11 підключено лівий індуктивний датчик
DriverMotor myMotor(NUMBER_OF_STEPS, step_pin, dir_pin, dir_en, Limit01, Limit02); // створено об'єкт типу DriverMotor, :

byte timeOutCount; // лічильник часу між прийомом даних
byte timeOut; // лічильник часу між прийомом даних
byte prevDataNum; // кількість даних порту в попередньому циклі
byte letterNum; // кількість прийнятих даних
char textBuf1[1]; // буфер для зберігання кількості кроків
char textBuf2[4]; // буфер 2 для зберігання швидкості переміщення каретки
int i, a, t, z;
int md=0;
unsigned int timeCounter=0; // лічильник часу
unsigned long lastMillis = 0;
void setup()
{
    Timer1.initialize(10); // ініціалізація таймера 1, період 10 мкс
    Timer1.attachInterrupt(timerInterrupt, 10); // задано обробку переривань
    }
    
```

Рис. 4. Розроблена програма керування кроковим двигуном від COM-порту комп'ютера

Середовище розробки Arduino IDE включає у свій склад інструмент "Serial Monitor" («Монітор порта»). Даний інструмент відображає дані, що надходять від Arduino на комп'ютер за послідовним інтерфейсом. Щоб надіслати дані зовнішньому пристрою, досить просто ввести текст у вікні програми і натиснути кнопку «Надіслати» (або натиснути Enter). З випадючого списку необхідно вибрати тільки швидкість передачі даних, що відповідає тій швидкості, яка вказана у функції Serial.begin() у програмі (скетчі). У нашому випадку швидкість 9600 бод.

Використаємо даний інструмент для керування кроковим двигуном навчальної транспортної лінії.

На початку роботи виконується позиціонування каретки транспортної лінії. Каретка рухається вліво (обертання крокового двигуна проти годинникової стрілки), поки не досягне крайнього лівого положення. При досягненні крайнього лівого положення спрацьовує лівий індуктивний датчик. Двигун, а відповідно і каретка, зупиняється. Починається рух каретки вправо (кроковий двигун обертається за годинниковою стрілкою), поки не буде досягнуто центру транспортної лінії. На цьому позиціонування закінчується. У «Монітор порта» приходить повідомлення START (рис. 5).



Рис. 5. Отримання повідомлення START

Тепер система готова приймати команду на переміщення. Команда приймається у форматі `ATS= steps_speed` (кількість кроків_швидкість).

Розглянемо декілька команд.

Команда `ATS= 3200_70` ввімкне кроковий двигун на обертання проти годинникової стрілки, що відповідає руху каретки в ліву сторону. Кроковий двигун виконає 3200 мікрокроків зі швидкістю 70 об/хв.

Команда `ATS= -6400_100` ввімкне кроковий двигун на обертання за годинниковою стрілкою, що відповідає руху каретки в праву сторону. Кроковий двигун виконає 6400 мікрокроків зі швидкістю 100 об/хв.

Після прийняття команди в «Моніторі порта» з'являється повідомлення ОК (рис. 6).

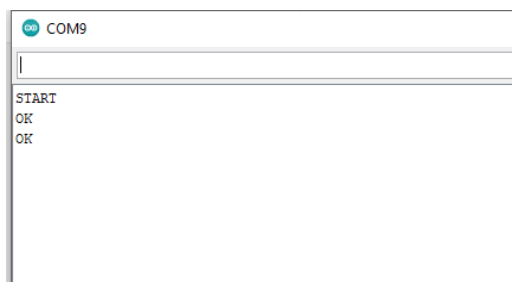


Рис. 6. Монітор порта під час виконання команд на переміщення

Розглянемо, як можна реалізувати керування кроковим двигуном навчальної транспортної лінії за допомогою смартфона або планшета.

Зв'язок між смартфоном та модулем Arduino будемо здійснювати за технологією Bluetooth. Звичайно, це обмежить можливість бездротового керування дистанцією близько 10 м, але в умовах лабораторії більшого і не потрібно. На основі такої технології можна успішно керувати нескладними роботами або пристроями автоматики, а смартфон буде слугувати безкоштовним універсальним пультом управління.

Для початку пояснимо, на якому принципі заснований зв'язок, який ми будемо використовувати. Як відомо, коли модуль Arduino підключається до комп'ютера, конфігурується віртуальний послідовний порт – COM-порт. Він використовується для заливки скетчів в Arduino, а також для обміну інформацією між комп'ютером та мікроконтролером. Також на платі Arduino є два контакти RX і TX, поєднані з пінами D1 і D0. Це контакти відповідно передача (Receive) і прийом (Transmit) стандартного інтерфейсу UART.

Підключивши до цих контактів перехідник Bluetooth-UART (у нашому випадку модуль HC-05) отримаємо апаратний канал зв'язку між пристроєм, підключеним Bluetooth до перехідника, і Arduino.

Таким чином, записуючи в послідовний порт інформацію з одного пристрою та зчитуючи її іншим (це можна робити у двох напрямках), можна організувати обмін інформацією між пристроями. Швидкість такого обміну у разі застосування модуля HC-05 можна налаштувати, у нашому випадку становитиме 38400 бод.

Для створення додатку для планшета або смартфона скористаємося можливостями проекту MIT App Inventor.

MIT App Inventor – це середовище програмування, розроблене у Массачусетському Технологічному Інституті (MIT). Він служить для розробки програм для мобільних пристроїв (смартфонів і планшетів), що працюють на операційній системі Android.

Це не зовсім мова програмування у загальноприйнятому значенні. При його використанні не треба писати текстовий код у вигляді рядків. Програма формується у вигляді зображених на екрані блоків, які просто перетягуються

та складаються, як пазли. Якщо блоки підходять один до одного за логікою програми, вони «злипаються», якщо не підходять, їх неможливо з'єднати. Звичайно, як і в кожній мові в ньому є свої тонкощі та прийоми, але на офіційному сайті є достатньо інформації та прикладів для освоєння мови.

Для того, щоб скористатися середовищем програмування App Inventor необхідно мати обліковий запис Google, за допомогою якого відбувається авторизація на сайті проекту ai2.appinventor.mit.edu. Створення програми відбувається у браузері за умови постійного підключення до Інтернету. Смартфон або планшет, на який встановлюватиметься створена за допомогою App Inventor програма, повинен мати версію ОС Android не нижче 4.0.

У браузері створюється дизайн (зовнішній вигляд) та логіка роботи програми у вигляді блоків, там же готовий проект компілюється у файл, що виконується з розширенням apk. App Inventor формує QR-код, що містить посилання на створений додаток. Таким чином, App Inventor дозволяє створювати цілком працездатні та наочні програми для Android.

Розроблюваний додаток повинен дозволяти знайти пристрій Bluetooth та підключитися до нього. Також повинна бути можливість задати кількість кроків, які повинен зробити кроковий двигун та швидкість, з якою це повинно бути зроблено. Із введених даних повинна сформуватися команда у форматі «ATS=кількість кроків_швидкість». Ця команда далі надсилається приєднаному пристрою і отримує відповідь.

Блокова програма має вигляд, що представлений на рис. 7.

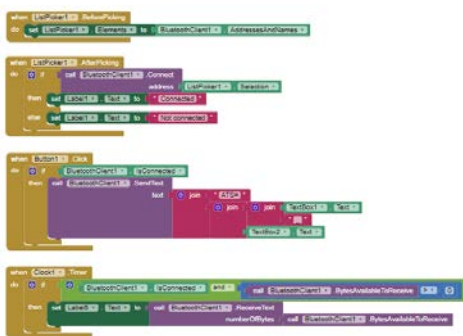


Рис. 7. Логіка роботи програми у вигляді блоків

Під час виклику списку пристроїв при натисненні на кнопку «Виберіть пристрій для підключення» для підключення до Bluetooth будуть відображатися адреси та імена усіх доступних пристроїв.

При виборі зі списку відбувається приєднання до пристрою. На екрані додатку статус підключення змінюється на «Connected». Після успішного підключення потрібно ввести задану кількість кроків та швидкість крокового двигуна. Після цього формується команда на відправку команди по Bluetooth у форматі «ATS=кіл-тькроків_швидкість». При успішному відправленні команди, назад отримується відповідь ОК.

Загальний вигляд додатку, встановлено на операційну систему Android представлено на рис. 8.

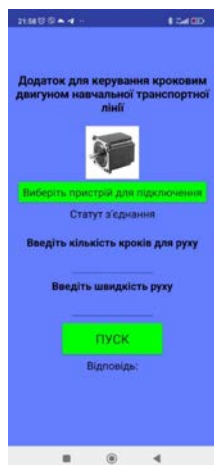


Рис. 8. Встановлений додаток

Тестування роботи додатку показало його повну дієздатність. Додаток дозволяє дистанційно через Bluetooth керувати роботою крокового двигуна.

Висновки

Розроблена бюджетна та дієва система керування кроковим двигуном навчальної транспортної лінії, що дозволяє динамічно змінювати параметри системи за допомогою або персонального комп'ютера (ПК), передаючи відповідні команди у систему через СОМ-порт, або за допомогою планшета, передаючи відповідні команди у систему через Bluetooth.

Така система може знайти застосування як у навчальному процесі для відпрацювання стандартних прийомів керування кроковими двигунами та навичок програмування мікроконтролерів, так і в промислових системах, які потребують керування положенням механізму з високою точністю.

Список використаної літератури

1. Димко С.С. Система керування кроковим двигуном на базі мікроконтролера та персонального комп'ютера / Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електротехніки та автоматики. Київ: «Політехніка», 2008. С. 308–311.
2. Бакалин А. Р., Миронец В. В., Голубев Л. П. Микропроцессорная система управления шаговым двигателем с помощью протокола UART / Технологии та дизайн. 2016, № 3. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2016_3_7.
3. Дослідження комп'ютерної системи для дистанційного керування кроковим двигуном у системах "розумний дім" / Д. В. Стаценко, Б. М. Злотенко, Т. І. Кулік, М. В. Латко // Сучасні електромеханічні та інформаційні системи : монографія / за заг. ред. І. В. Панасюка. Київ : КНУТД, 2021. С. 9–14.
4. Шеремет А. И., Климченкова Н. В., Климченков А. Г. Математическое описание шагового электропривода и реализация его системы управления на базе микроконтроллера Arduino // Научный вестник ДГМА. № 3 (24Е), 2017. С. 87–96.
5. Офіційна документація проекту Arduino [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.arduino.cc/>

References

1. Dymko S.S. Stepper motor control system based on a microcontroller and a personal computer / Materials of the international scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students. Modern problems of electrical engineering and automation. Kyiv: Polytechnic, 2008. P. 308–311.
2. Bakalyn A. R., Myronets V. V., Golubev L. P. (2016) Microprocessor control system of a stepper motor using the UART protocol / *Technologies and design*. No. 3. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2016_3_7.
3. Research of a computer system for remote control of a stepper motor in "smart home" systems / D. V. Statsenko, B. M. Zlotenko, T. I. Kulik, M. V. Latko // *Modern electromechanical and information systems: monograph* / in general ed. I. V. Panasyuk. Kyiv: KNUTD, 2021. P. 9–14.
4. Sheremet A. I., Klimchenkova N. V., Klimchenkov A. G. (2017) Mathematical description of the stepper electric drive and realization of its control system based on the Arduino microcontroller / *Scientific Bulletin of the DGMA*. No. 3 (24E). P. 87–96.
5. Official documentation of the Arduino project [Electronic resource]. Retrieved from: <https://www.arduino.cc/>