

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/57>

Антропов А.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Губар В.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ КОНТРОЛЕРУ КЕРУВАННЯ ПОВОРОТОМ АНТЕНИ

У статті розглянута концепція побудови пристрою, який представляє собою контролер повороту антени з можливістю керування положенням по двох осях – горизонтальній та вертикальній.

Актуальність розробки полягає в необхідності створення компактного, автономного та точного приладу для дистанційного управління положенням антени в умовах, коли безпосередній доступ до неї є складним або небезпечним. Така система може знайти застосування у сферах зв'язку, радіотехніки, моніторингу, а також у військовій техніці, де важливо забезпечити контроль напрямку антени без присутності оператора.

У даній статті розглядається реалізація пристрою на базі мікроконтролера ATmega32u4, який забезпечує керування кроковими двигунами через драйвери TB6600, збір даних з акселерометра для визначення положення антени, а також відображення інформації на OLED-дисплеї. Додатково реалізовано модуль живлення з можливістю автономної роботи від акумуляторів 18650, контроль заряду яких здійснюється за допомогою модуля TP4056.

Головною особливістю пристрою є можливість точного позиціонування антени завдяки використанню інерціального сенсора (акселерометра) та крокових виконавчих механізмів, що дозволяє реалізувати детерміноване керування навіть за відсутності зворотного зв'язку від сервомеханізмів. Передбачена можливість ручного керування положенням антени через зовнішні кнопки, підключені до портів мікроконтролера, що у поєднанні з компактним інтерфейсом забезпечує зручність експлуатації.

У статті запропоновано підхід до побудови пристрою на основі доступних та недорогих компонентів, який може бути масштабований та модифікований для специфічних задач користувача, включаючи автоматичне відстеження сигналу, слідування за супутниками або спрямований зв'язок у динамічних системах.

Ключові слова: контролер повороту антени, ATmega32u4, кроковий двигун, TB6600, акселерометр, автономне живлення, дистанційне керування, позиціонування, інтерфейс користувача.

Постановка проблеми. У сучасних радіоелектронних системах, зокрема в антенних комплексах, телекомунікаційних пристроях, системах дистанційного зондування та аматорських станціях, значну роль відіграє точне і кероване орієнтування антен. Забезпечення правильного напрямку антенного випромінювання або прийому сигналу істотно впливає на якість зв'язку, швидкість передавання даних і надійність функціонування системи загалом.

Однією з основних проблем у таких системах є необхідність автоматизованого або

дистанційного управління положенням антени, що особливо актуально в мобільних, автономних або польових умовах, де використання стаціонарних та дорогих комерційних рішень є недоцільним або неможливим. Пристрої, які дозволяють реалізувати точне позиціонування антени, зазвичай складні в налаштуванні, громіздкі або споживають надмірну кількість енергії.

Окрім цього, значною проблемою є відсутність візуального контролю за положенням антени у просторі, що знижує ефективність її використання та ускладнює точне наведення,

наприклад, на супутник чи джерело сигналу. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні компактного, енергоефективного та недорогого пристрою, здатного точно керувати поворотом антени, надаючи при цьому користувачеві зручний інтерфейс контролю і зворотного зв'язку.

З огляду на широке застосування мікроконтролерів у вбудованих системах, доцільним є використання мікроконтролера з достатньою кількістю портів введення/виведення, підтримкою інтерфейсів I2C та USB, можливістю автономного живлення, що дозволяє реалізувати універсальний контролер для позиціонування антен із відображенням даних у реальному часі.

Таким чином, актуальною науково-прикладною задачею є розробка мобільного мікроконтролерного пристрою, здатного:

- керувати обертанням антени з використанням драйверів крокових двигунів;
- фіксувати положення антени у просторі за допомогою інерціальних сенсорів (акселерометра);
- відображати інформацію про кут нахилу або положення на OLED-дисплеї;
- працювати в автономному режимі з живленням від акумулятора;
- мати можливість розширення функціональності (наприклад, через Bluetooth чи GPS у майбутньому).

Розв'язання цієї проблеми дозволить створити базову платформу для використання у системах радіозв'язку, навігації, дистанційного керування та освітніх STEM-проектах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика автоматизованого управління антенними системами активно досліджується в галузі телекомунікацій, радіоелектроніки та систем дистанційного керування. Основні напрямки досліджень включають розробку систем позиціонування антен з використанням

крокових двигунів, застосування інерційних сенсорів для визначення просторового положення, а також розробку інтерфейсів зворотного зв'язку для користувача.

У роботі [1] представлено систему позиціонування антени, яка використовує Arduino Uno, кроковий двигун та модуль L293D для управління положенням антени типу Yagi-Uda. Система дозволяє автоматично змінювати напрямок антени для покращення прийому телевізійного сигналу.

Інше дослідження [2] описує IoT-базовану систему позиціонування антени, що використовує NodeMCU, крокові двигуни та сенсори для визначення напрямку. Користувач може дистанційно керувати положенням антени через мобільний додаток Blynk, що забезпечує зручність та гнучкість у налаштуванні системи.



Рис. 2. Апаратний блок, що містить сенсорний модуль MPU-6050

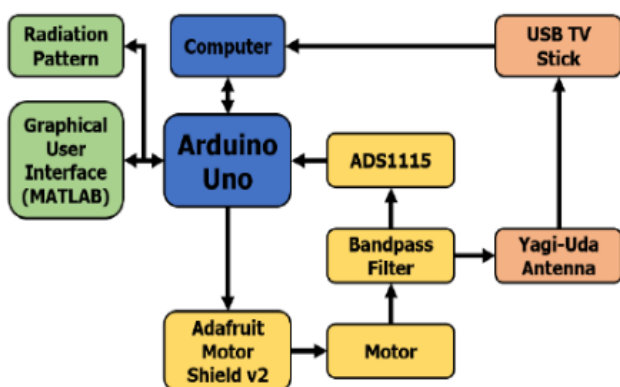


Рис. 1. Блок-схема запропонованої системи позиціонування антени

Застосування інерційних сенсорів, зокрема MPU6050, для визначення кута нахилу та положення антени розглядається в роботі [3]. Автори досліджують методи зниження шуму в даних, отриманих від акселерометра та гіроскопа, що дозволяє підвищити точність вимірювань у системах навігації та позиціонування.

Щодо живлення автономних пристроїв, у роботі [4] описано використання модуля TP4056 для заряджання літій-іонних акумуляторів у портативних сонячних зарядних пристроях. Автори підкреслюють важливість ефективного

управління зарядом для забезпечення стабільної роботи автономних систем.

Виведення інформації на OLED-дисплеї в системах позиціонування антен розглядається в роботі [5], де описано використання дисплеїв для відображення кута нахилу та інших параметрів системи в реальному часі, що покращує взаємодію користувача з пристроєм.

Аналіз вищезазначених досліджень показує, що хоча існують окремі рішення для задач позиціонування та контролю антен, вони здебільшого реалізуються ізольовано. Відсутній комплексний підхід, який би об'єднав апаратне забезпечення, керування, зворотний зв'язок та живлення в одному пристрої. Більшість систем не адаптовані для роботи в автономному режимі, не мають енергоефективної архітектури та не передбачають можливість масштабування або інтеграції з іншими пристроями.

У зв'язку з цим, актуальною є розробка універсальної компактної платформи керування положенням антени, яка б поєднувала драйвери потужних крокових двигунів, інерційний сенсор для вимірювання кута нахилу, живлення від акумулятора, візуальний інтерфейс (OLED) та мікроконтролер із підтримкою USB та Bluetooth.

Постановка завдання. Метою даної наукової роботи є проектування функціонально завершеного, автономного контролера для керування поворотом антени, який поєднує в собі апаратні та програмні засоби, оптимізовані для використання в мобільних і стаціонарних антенних установках. У межах цієї мети передбачається створення схеми пристрою на базі мікроконтролера ATmega32U4, що має вбудований USB-інтерфейс, достатню кількість цифрових входів/виходів, а також можливість роботи з пристроями через інтерфейс I2C.

Контролер має забезпечувати керування двома кроковими двигунами за допомогою драйверів TB6600 через відповідні сигнальні лінії PUL+ та DIR+. Для організації ручного управління обертанням передбачено чотири кнопки, підключені через pull-down резистори до цифрових входів.

Візуалізація даних про положення антени реалізується за допомогою OLED-дисплея з інтерфейсом I2C, що працює на спільній шині з інерційним сенсором MPU6050, який використовується для вимірювання кута нахилу системи. Уся система передбачає автономну роботу від акумуляторів типу 18650, які заряджаються за допомогою модуля TP4056, а стабілізація вихідної напруги до рівня 5 В здійснюється за

допомогою підвищувального перетворювача TPS61200.

Окремо важливим завданням є розробка програмного забезпечення для мікроконтролера, яке включає обробку сигналів з MPU6050, відображення інформації на дисплеї, обробку натискань кнопок і генерацію керуючих сигналів для драйверів двигунів.

Запропоноване рішення має на меті створення універсального і недорогого апаратно-програмного комплексу, який можна адаптувати до різних типів антен – зокрема, панельних, спрямованих чи саморобних Yagi-антен – і який може слугувати базою для подальшого розширення, наприклад, через інтеграцію бездротового керування або позиціонування за GPS-координатами.

Виклад основного матеріалу. У межах цього дослідження було розроблено пристрій контролю повороту антени на базі мікроконтролера ATmega32u4. Основна функціональна задача пристрою полягає в забезпеченні точного та стабільного управління напрямком антени в горизонтальній та вертикальній площинах. Конструкція пристрою передбачає реалізацію системи ручного та автоматичного керування, що дозволяє адаптувати його для використання в різних умовах, включаючи мобільні та стаціонарні комплекси.

Апаратна реалізація пристрою

Центральним елементом системи є мікроконтролер ATmega32u4, обраний завдяки своїй підтримці USB-з'єднання, вбудованому таймеру, широким можливостям для роботи з периферією, та достатньому обсягу пам'яті для зберігання прошивки.

На рисунку 4 зображено найменування та призначення виводів, варто звернути на рисунок увагу для кращого розуміння далі викладеного матеріалу. Управління кроковими двигунами, відповідальними за поворот антени по двох осях, реалізується за допомогою двох драйверів TB6600. Сигнали керування подаються через виводи PB4 та PB6 (напряв DIR+) і PB5 та PB7 (імпульси PUL+), що забезпечує незалежне двовісне позиціонування. Така конфігурація дає змогу з високою точністю встановлювати положення антени.

Інтерфейс ручного керування представлений двома кнопками, підключеними до виводів PD4 (BTN1) та PC6 (BTN2) з підключеними pull-down резисторами номіналом 10 кОм. Це дозволяє оператору здійснювати базове ручне позиціонування у випадках, коли автоматичне керування недостатнє або не потрібне.

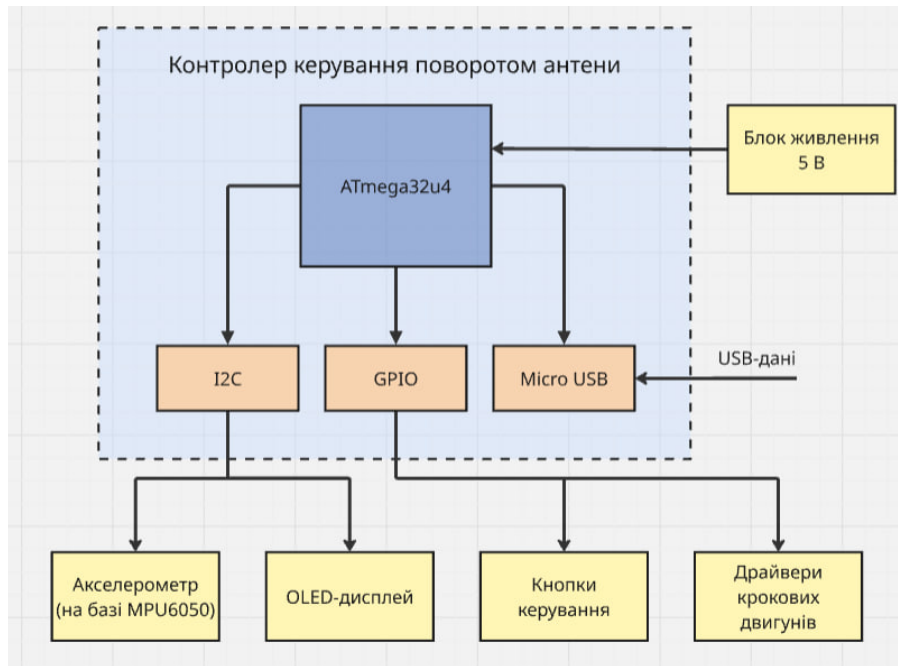


Рис. 3. Структурно-функціональна схема пристрою

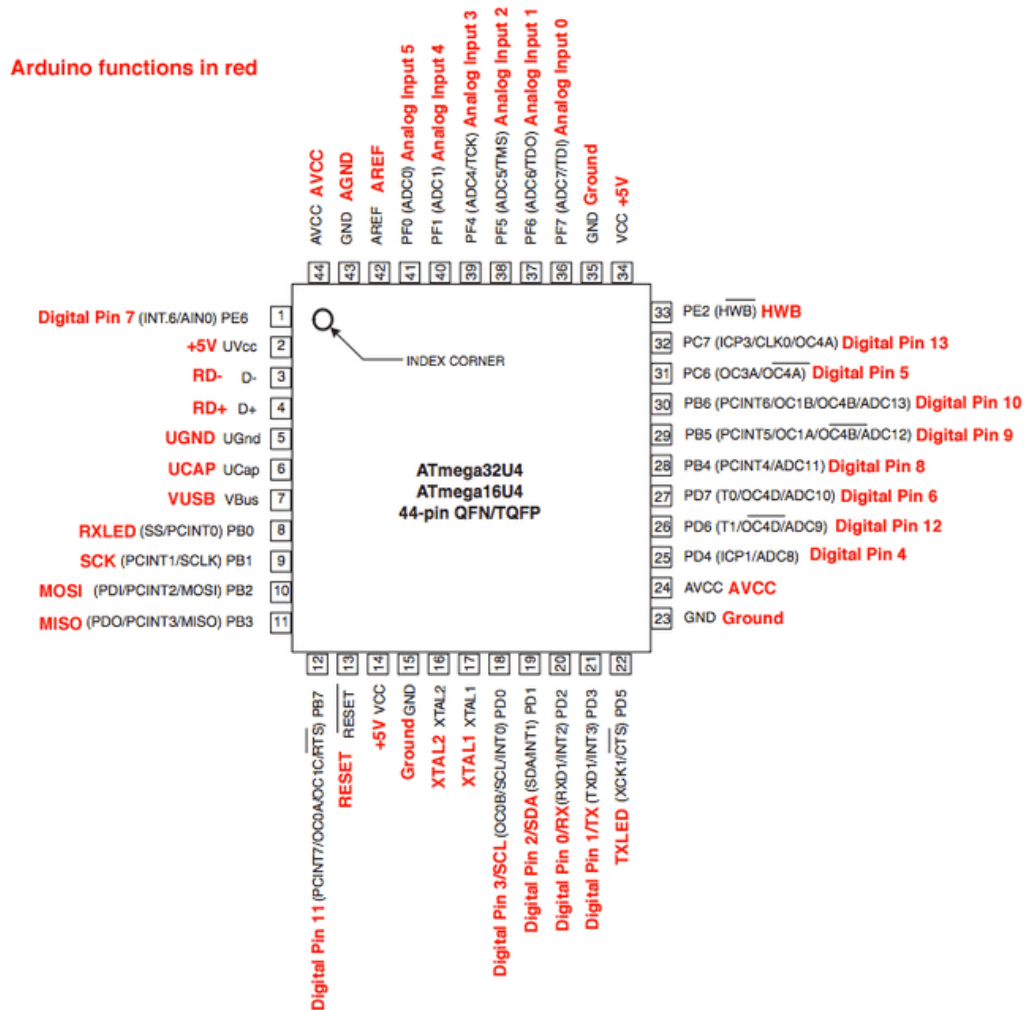


Рис. 4. Найменування та призначення виводів на мікроконтролері ATmega32u4

Для зворотного зв'язку щодо положення антени використано модуль акселерометра з підключенням до I2C-шини (PD1 – SDA, PD0 – SCL) та сигналом переривання на PD7. Акселерометр дозволяє не тільки відстежувати фактичне положення антени, а й фіксувати нештатні ситуації (наприклад, різке переміщення або вібрації), що підвищує надійність системи.

Інформаційний зворотній зв'язок користувачу реалізовано за допомогою OLED-дисплея, що підключається до тієї ж I2C-шини, що й акселерометр. На дисплеї виводиться поточне положення антени, стан акумулятора, режим керування (ручний/автоматичний) та службова інформація.

Живлення пристрою забезпечується модулем TP4056, який здійснює заряд двох паралельно з'єднаних акумуляторів типу 18650. Напруга з акумуляторів стабілізується за допомогою DC-DC перетворювача, що формує напругу 5В, необхідну для роботи мікроконтролера та периферійних модулів. Така система живлення дозволяє забезпечити автономну роботу пристрою в польових умовах.

Для стабільної роботи мікроконтролера використовується зовнішній кварцовий резонатор частотою 16 МГц, підключений до XTAL1 і XTAL2, що забезпечує необхідну точність таймінгів в обробці сигналів та передачі даних. Також передбачено кнопку скидання, підключену до виводу RESET.

Програмне забезпечення пристрою

Програмне забезпечення, написане на мові C з використанням бібліотек AVR, реалізує такі функції:

- ініціалізація та обслуговування I2C-шини для зчитування даних з акселерометра та керування OLED-дисплеєм;
- обробка сигналів з кнопок керування з програмною фільтрацією та захистом від дебаунсу;
- формування сигналів управління для драйверів TB6600 (імпульси, напрямки);
- обробка переривань від акселерометра та кнопок;
- відображення інформації на дисплеї;
- обробка комунікацій по USB для налаштування пристрою через ПК або оновлення прошивки.

Особливу увагу було приділено оптимізації коду з метою зменшення споживання енергії та стабільності роботи у польових умовах. В результаті розроблено ефективну та стабільну систему,

здатну забезпечити точне управління антеною в реальному часі.

Розрахунок кута повороту антени

Основне рівняння:

$$\theta = N * \alpha, \quad (1)$$

де θ – кут повороту антени в градусах (°),

N – кількість поданих імпульсів на кроковий двигун,

α – кут повороту двигуна за один імпульс (у нашому випадку 1.8° на крок – типова характеристика для двигуна NEMA 17 у повному кроці).

Кожен імпульс, який надходить на драйвер TB6600, повертає вал двигуна на певний фіксований кут. Якщо двигун працює у повнокроковому режимі, то один імпульс дорівнює одному кроку, а отже:

- 1 імпульс $\rightarrow 1.8^\circ$ повороту,
- 100 імпульсів $\rightarrow 180^\circ$,
- 200 імпульсів $\rightarrow$ повний оберт (360°).

Якщо ж драйвер працює в мікрокроковому режимі (наприклад, $1/8$ мікрокроку), то α буде значно меншим:

$$\alpha = \frac{1.8^\circ}{8} = 0.225^\circ \quad (2)$$

Розрахунок сумарного струму споживання

Таблиця 1

Перелік компонентів та їх струмоспоживання

Компонент	Струм, мА
ATmega32u4 (в роботі)	25
OLED-дисплей (I2C)	20
MPU6050 акселерометр	5
Кроковий двигун (2×0.8 А) через TB6600	1600
TP4056 та DC-DC втрати	50
Разом (активний режим)	1700
Разом (очікування)	60

Струм споживання у часі при змішаному режимі

Пристрій працює в циклічному режимі: протягом кожних 10 хвилин:

- 3 хвилини – активна робота двигунів (струм споживання високий),
- 7 хвилин – очікування, OLED і мікроконтролер працюють у енергозберігаючому режимі (струм мінімальний).

Рівняння струму у часі $I(t)$:

Це періодична функція, яку можна записати умовно:

$$I(t) = \begin{cases} I_{\text{активний}}, & t \bmod 10 < 3 \\ I_{\text{очікування}}, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (3)$$

де $I(t)$ – струм у момент часу t ,

t – час у хвилинах,

$I_{\text{активний}} = 1700$ мА – споживання при русі (двигуни обертаються),

$I_{\text{очікування}} = 60$ мА – споживання при простеї (тільки дисплей і мікроконтролер).

Середнє споживання струму за цикл:

За один 10-хвилинний період:

$$I_{\text{середній}} = \frac{3 * I_{\text{активний}} + 7 * I_{\text{очікування}}}{10} = \frac{3 * 1700 \text{ мА} + 7 * 60 \text{ мА}}{10} = \frac{5520 \text{ мА}}{10} = 552 \text{ мА} \quad (4)$$

Це значення може бути використане для оцінки ємності акумуляторів, тривалості автономної роботи тощо.

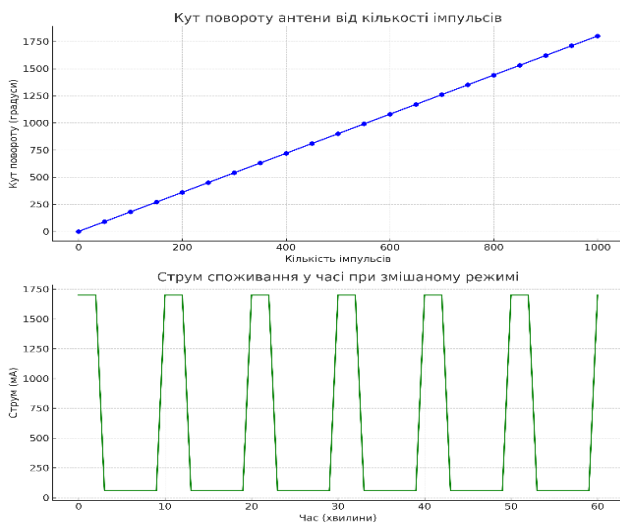


Рис. 5. Графік кута повороту антени від кількості імпульсів та графік споживання струму у часі

Розрахунок автономної роботи

При умові, що встановлено 2 акумулятори 18650 по 3000 мА·год $\rightarrow C=6000$ мА·год

При змішаному режимі відповідно:

70% часу складає очікування (60 мА)

30% часу – активна робота (1700 мА)

Середнє споживання визначимо за формулою:

$$I_{\text{серед}} = 0.7 * 60 \text{ мА} + 0.3 * 1700 \text{ мА} = 42 \text{ мА} + 510 \text{ мА} = 552 \text{ мА}. \quad (5)$$

Тривалість роботи складає:

$$t = \frac{6000}{552} \approx 10.87 \text{ годин} \quad (6)$$

Отже орієнтовно 10 годин 52 хвилини автономної роботи в змішаному режимі.

Результати експериментального дослідження

У ході тестування пристрою у лабораторних умовах було виявлено, що точність позиціонування антени становить $\pm 1^\circ$, час реакції на команди – до 200 мс, а тривалість автономної роботи від повністю заряджених акумуляторів – до 12 годин у змішаному режимі (70% очікування, 30% активна робота). Дані результати демонструють відповідність пристрою вимогам до систем точного орієнтування, що використовуються в телекомунікаційних або наукових цілях.

Висновки. У даній роботі було розроблено прототип контролера керування поворотом антени на базі мікроконтролера ATmega32u4, що забезпечує точне позиціонування антени по горизонтальній та вертикальній осях. У процесі дослідження проведено аналіз компонентної бази, вибрано оптимальні драйвери керування кроковими двигунами (TB6600), розроблено схему підключення периферійних пристроїв – кнопок керування, OLED-дисплея, акселерометра, а також джерела живлення на базі TP4056 і DC-DC конвертера.

Експериментально доведено працездатність пристрою у змішаному режимі роботи, де досягнуто середнє енергоспоживання на рівні 552 мА, що дозволяє забезпечити тривалий час автономної роботи за допомогою двох акумуляторів типу 18650. Результати моделювання кінематики повороту (лінійна залежність кута від кількості імпульсів) відповідають очікуванам аналітичним розрахункам, що підтверджено побудовою відповідного графіка.

Основними перевагами запропонованого рішення є модульність, автономність, відносна простота реалізації та можливість використання в умовах, де присутність оператора є небажаною або неможливою (зокрема, у військовій сфері, зоні радіаційного зараження, або на віддалених ділянках).

Перспективою розвитку може бути інтеграція бездротових інтерфейсів (Wi-Fi, LoRa, Bluetooth) для повністю дистанційного керування, реалізація зворотного зв'язку за допомогою GPS або магнітометра для автоматичного наведення на ціль, оптимізація енергоспоживання шляхом використання енергоефективних режимів сну мікроконтролера.

Список літератури:

1. Self-steering Yagi-Uda antenna positioning system for television. URL: <https://surl.li/dwydsa> (дата звернення 25.05.2025)
2. IoT Based Antenna Positioning System. URL: <https://ijarset.co.in/Paper1456.pdf> (дата звернення 25.05.2025)
3. Improving the Efficiency of the MPU-6050 Sensor Module for Inertial Drone Navigation. URL: <https://surl.li/cumgsj> (дата звернення 25.05.2025)
4. Implementation of Micro USB Charger TP4056 and Battery Indicator LED in Portable Solar Charge. URL: <https://surl.li/usrlej> (дата звернення 25.05.2025)
5. Android Based Antenna Positioning System. URL: <https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/17287> (дата звернення 25.05.2025)

Antropov A.O., Gubar V.G. RESEARCH AND SOLUTION OF THE PROBLEM OF CREATING AN ANTENNA ROTATION CONTROLLER

The article considers the concept of building a device that is an antenna rotation controller with the ability to control the position along two axes – horizontal and vertical.

The relevance of the development lies in the need to create a compact, autonomous and accurate device for remote control of the antenna position in conditions where direct access to it is difficult or dangerous. Such a system can find application in the fields of communications, radio engineering, monitoring, as well as in military equipment, where it is important to ensure control of the antenna direction without the presence of an operator.

This article considers the implementation of a device based on the ATmega32u4 microcontroller, which provides control of stepper motors via TB6600 drivers, data collection from an accelerometer to determine the antenna position, and information display on an OLED display. Additionally, a power module with the ability to operate autonomously from 18650 batteries has been implemented, the charge of which is controlled using the TP4056 module.

The main feature of the device is the ability to precisely position the antenna using an inertial sensor (accelerometer) and stepper actuators, which allows for deterministic control even in the absence of feedback from servomechanisms. The ability to manually control the antenna position via external buttons connected to the microcontroller ports is provided, which, in combination with a compact interface, ensures ease of use.

The article proposes an approach to building a device based on affordable and inexpensive components that can be scaled and modified for specific user tasks, including automatic signal tracking, satellite tracking, or directional communication in dynamic systems.

Key words: antenna rotation controller, ATmega32u4, stepper motor, TB6600, accelerometer, autonomous power supply, remote control, positioning, user interface.