

УДК 62-83:681.5

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД З БЕЗДРОТОВИМ ІНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

- КУЛИНИЧ Е.М.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kuliniched@gmail.com;
- НАЗАРОВА О.С.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nazarova16@gmail.com
- ГОНЧАРОВ Д.В.** магістр кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nicksonszp@gmail.com
- ЧЕРНИШЕВ С.Г.** магістр кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: flashboy811@gmail.com
- ПІСКУН В.В.** студент групи Е-317 кафедри електропривода і автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: vlad.piskun.2000@gmail.com

Мета роботи. Розробка лабораторного стенду з бездротовим інтерфейсом для вивчення та дослідження систем автоматичного керування електроприводами постійного струму.

Методи дослідження. Фізичний експеримент на розробленому лабораторному стенді, комп'ютерне моделювання, розрахунково-аналітичний.

Отримані результати. В ході дослідження було розглянуто та проаналізовано переваги та недоліки існуючих розробок лабораторних стендів з віртуальною та дистанційною складовою, можливістю організації бездротового інтерфейсу, з урахуванням економічності, мобільності, надійності і простоти виконання, а також можливості використання як навчального стенду. Розроблено підключення стенду за допомогою USB та Wi-Fi. Для силового комутатора та системи автоматичного керування використано мікроконтролер STM32F103C8T6. Інтерфейсна частина складається з плати NodeMCU, модуля MicroSD карти, блоку керування інтерфейсом, LCD 16x2 з I2C розширювачем. Передбачено можливість поточної дистанційної передачі інформації про режими та параметри роботи двигуна до комп'ютера з виводом на браузер через модуль Wi-Fi ESP8266MOD. Розроблено замкнену систему автоматичного керування двигуном постійного струму з ПІД-регуляторами струму та ЕРС. Було проведено експерименти з імпульсним та плавним збільшенням швидкості двигуна та варіюванням складових ПІД-регуляторів за допомогою пульта керування. Всі графіки результатів експерименту були отримані на веб-сторінці з фіксованою IP-адресою в браузері через Wi-Fi.

Наукова новизна. Запропоновано та розроблено структуру системи дистанційного моніторингу та керування на основі апаратно-програмного суміщення телекомунікаційної та виміральної систем, яка відрізняється від існуючих наявністю поточної бездротової передачі інформації, що дозволяє дистанційно отримувати дані досліджень систем автоматичного керування двигуном постійного струму.

Практична цінність. Розроблений лабораторний стенд з бездротовим інтерфейсом дозволяє дистанційно отримувати і зберігати експериментальні дані про параметри досліджуваного двигуна у режимі реального часу.

Ключові слова: лабораторний стенд; бездротовий інтерфейс; мікроконтролер; система автоматичного керування; електропривод; постійний струм.

I. ВСТУП

Наявність сучасних лабораторних стендів та апаратних засобів навчання є запорукою якісного викладання технічних дисциплін та отримання студентами практичних навичок роботи з обладнанням, що іде в ногу із часом. Використання у навчальному процесі реального дослідницького обладнання сприяє підготовці не тільки освічених фахівців, але й людей, які

здатні творчо мислити, швидко реагувати на певні нестандартні ситуації, вони постійно удосконалюють свої знання і використовують їх у практичній діяльності.

Стрімкий розвиток сучасної обчислювальної техніки, цифрових комунікацій, робототехніки та інформаційних технологій сприяє впровадженню мікропроцесорної техніки, цифрових приладів з дискретною формою подання сигналу у різноманітні елект-

ромеханічні системи [1]-[3], що покращує їх технічні характеристики, зменшує енергоспоживання, габаритні розміри, підвищує надійність, швидкість обробки та передачі даних.

Однією з нових технологій є технологія поєднання віртуальних і дистанційних приладів, яка дозволяє створювати системи вимірювання, дослідження та керування з можливістю дистанційного підключення. Особливістю такої технології є те, що частина приладів та систем реалізується на основі приладів введення-виведення аналогових та цифрових сигналів, а функціональна і користувацький інтерфейс – програмно. Разом з цим можуть вирішуватися питання обробки інформації і представлення результатів у певному вигляді, а також можливість моніторингу і діагностування обладнання.

Зважаючи на складну ситуацію у світі із захворюваністю COVID-19 [4], більшість навчальних закладів було вимушено впровадити у повному або змішаному форматі дистанційну форму навчання, що вплинуло на можливість студентів у повній мірі скористатися лабораторними засобами, які задіяні у навчальному процесі. Тому розробка і впровадження бездротових і дистанційних технологій розширить можливості здобувати якісні знання для студентів.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Досвід розробки спеціалізованих лабораторних стендів та лабораторних комплексів з використанням віртуальної частини [5,6] та дистанційної, бездротової передачі даних досить поширений. Відомі розробки лабораторних стендів для вивчення протоколів промислових мереж ModBUS, ProfiNET та EtherCAT на базі одноплатного мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3. Розглядаються можливості інтеграції Інтернету речей (IoT), що розвивається в сучасному світі, в протоколи промислових систем керування [7].

Одним із підходів у організації віддалених лабораторій є розподілена архітектура, за допомогою якої формуються різні рівні доступу до виконання різних функцій для студентів та викладачів [8]. До структур лабораторних стендів включають моделювання етапів виробничого процесу, що проводиться на різних робочих станціях, та окремі типи продукції [9]. Розглянуто та висвітлено сильні та слабкі сторони різних підходів до лабораторних досліджень у галузі електротехніки, спираючись на існуючі стандарти освіти, орієнтації на сприйняття європейського обладнання студентами [10]. Віддалені лабораторії дозволяють віддалений доступ викладачів та студентів для здійснення дидактичного досвіду управління процесами на експериментальних платформах, наприклад, підключення реального обладнання до Matlab/Simulink та Moodle. Зв'язок з Moodle дозволяє викладачам та студентам отримати віддалений доступ до лабораторії, використовуючи їхні повноваження як студента / викладача звичайного курсу [11]. Віддалені лабораторії дозволяють взаємодіяти з реальним обладнанням че-

рез віддалений доступ [12], [13] і оперувати великим обсягом різноманітної інформації, що складається з етапів концептуального логічного і фізичного моделювання [14]. Для задоволення сучасних вимог енергетичних компаній важливо постійно вдосконалювати функціональність систем моніторингу промислового обладнання. Що стало однією з причин створення лабораторного стенду для ознайомлення студентів з системою моніторингу трансформаторів під час занять з автоматизації енергосистеми [15]. Функції лабораторних стендів розширюються шляхом доповнення функціями тестування алгоритмів керування [16], можливостями варіювання конфігурації компонентів схем, вимірювальних пристроїв [17], оснащенням автоматизованою системою контролю за виконанням лабораторних робіт [18], [19].

Отже, ідея створення лабораторного стенду з віртуальною частиною, бездротовим інтерфейсом для вивчення та дослідження режимів електропривода постійного струму є актуальною, участь у розробці стенду студентів сприяє формуванню у них творчої складової, здатності аналізувати отримані результати, приймати рішення у нестандартних ситуаціях, що підвищує рівень їх теоретичної і практичної підготовки. Це, у свою чергу, відкриває нові шляхи та підходи до вирішення завдань підвищення якості підготовки студентів.

III. МЕТА РОБОТИ

Розглянути та проаналізувати переваги та недоліки існуючих розробок за досліджуваною тематикою з урахуванням економічності, мобільності, надійності і простоти виконання, а також можливості використання як навчального стенду. Розробити альтернативні варіанти підключення стенду за допомогою USB та Wi-Fi, силовий комутатор, давачі для розробки замкненої системи автоматичного керування швидкістю ДПС. Передбачити можливість поточної дистанційної передачі інформації про режими та параметри роботи двигуна до комп'ютера з виводом на браузер.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Двигуни постійного струму знайшли застосування в багатьох галузях промисловості, вивчаються у більшості освітніх програм галузі «Електрична інженерія», а також спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», тому виникає необхідність у вивченні та дослідженні систем автоматичного керування (САК) двигуном постійного струму (ДПС) зі зворотним зв'язком з урахуванням сучасних ІТ-технологій передачі та обробки даних.

Для виготовлення стенду (рис. 1) було використано електромеханічну частину шуруповерта фірми Powertec pt 3104\1, яка має такі характеристики електродвигун - 230В ~ 50/60 Гц, напруга живлення – 12 В DC, швидкість - 0-550 об/хв, акумулятор – 12 В/1200 мАч. За допомогою RLC тестера MG328

було визначені опір якоря двигуна ($R_{\text{я}} = 6 \text{ Ом}$) та індуктивність обмотки якоря ($L_{\text{я}} = 0,5 \text{ мГн}$).

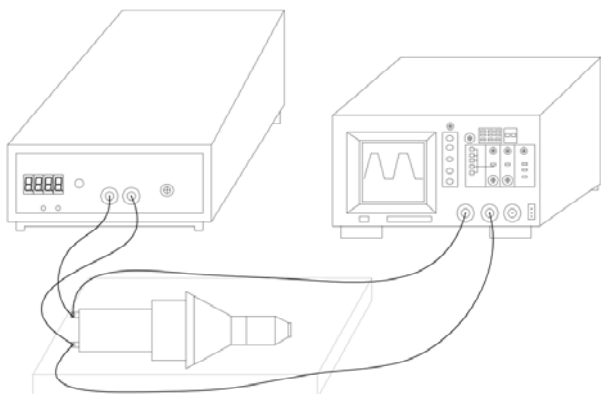


Рисунок 1. Зовнішній вигляд стенду

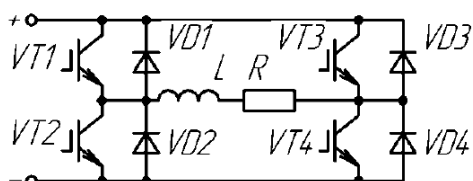


Рисунок 2. Схема реверсивного широтно-імпульсного перетворювача за мостовою схемою

Для живлення стенду використано лабораторне джерело постійного струму, розроблено силовий комутатор (DC-DC перетворювач) [20] побудований за схемою реверсивного широтно-імпульсного перетворювача з мостовою схемою, яка називається H-подібною схемою (рис. 2). Вона відповідає наступним критеріям: високий ККД, за рахунок малих втрат; можливість реверсивного руху; можливість керування ШІМ сигналом. В якості силових елементів використано MOSTFET транзистори.

Для реалізації зворотного зв'язку за струмом вибрано датчик струму, який має ефект Холла і невеликий розмір - TMCS1100 від Texas Instruments.

Розроблено електричну принципову схему [21], шаблон для виготовлення друкованої плати, 3D модель друкованої з поверхневим монтажем за допомогою програми EasyEDA (крос-платформа веб-орієнтоване середовище автоматизації проектування електроніки, включає в себе редактор принципів схем, редактор топології друкованих плат, SPICE-симулятор, хмарне сховище даних, систему керування проектами, а також функцію замовлення і виготовлення друкованих плат), виготовлено плату силового комутатора (рис. 3).

Функціональна схема представлена на рисунку 4 [22]. Головним елементом стенду є мікроконтролер, він обслуговує обробку і обмін інформацією, яка поступає від елементів схеми. Для живлення системи використовується джерело постійної напруги 12 В на

базі лабораторного блока живлення з регульованою напругою до 40 В та струмом до 8 А. Для живлення мікроконтролера і пульта налагодження ПІД-регулятора маємо два перетворювача постійної напруги 12 В в постійну 5 В, так як робоча напруга мікроконтролера і пульта становить 5 В. Силова схема (комутатор) на основі польових транзисторів MOSFET, які приймають сигнал керування ШІМ від мікроконтролера і подають напругу на ДПС. Від двигуна постійного струму надходить зворотній зв'язок за ЕРС до АЦП процесора.

Пульт керування призначений для керування пуском, реверсом та зупинкою двигуна за допомогою трьох кнопок (ЛІВОРУЧ, ЗУПИНКА, ПРАВОРУЧ), також для регулювання швидкості призначений потенціометр (ШВИДКІСТЬ).

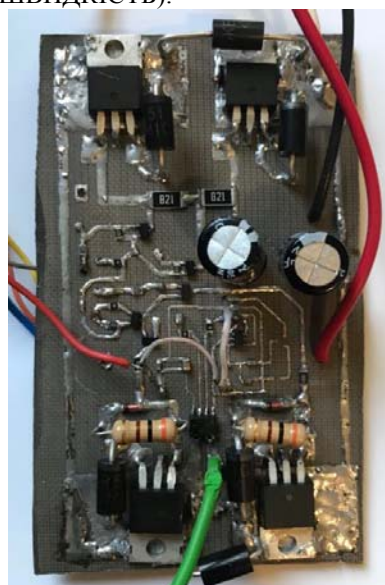


Рисунок 3. Виготовлена плата силового комутатора

Метою розробки оперативної схеми були такі критерії: використати найменшу кількість ніжок мікроконтролера, для подальшого удосконалення проекту, наприклад, підключення додаткових модулів; захистити мікроконтролер, в разі пробією силових транзисторів, враховуючи навантажувальну здатність ніжки не більше 20 мА; досягти високої частоти керування, оскільки людське вухо сприймає шум на частотах від 16 Гц до 20 КГц, для більш комфортного користування було завдання забезпечити частоту понад 20 КГц.

Для керування польовими транзисторами існують спеціалізовані драйвери, але в цілях економії оперативна схема була побудована на простих мало-потужних польових транзисторах. Оскільки польові транзистори мають ізольований затвор, це оберігає мікроконтролер в разі пробією силових транзисторів. Також це дозволило підняти напругу на затворах силових транзисторів, оскільки для керування силовими транзисторами необхідна напруга 10-18 В, а напруга на ніжці мікроконтролера становить 5 В. Для малопо-

тужних польових транзисторів струмового електричного навантаження на ніжки мікроконтролера в 20 мА достатньо.

Електричні схеми були спроектовані і розраховані в LTspice (SwitcherCAD), який являє собою універсальну середу для проектування і створення електричних схем з інтегрованим симулятором змішаного моделювання. Модель схеми керування двигуном постійного струму з реверсивним обертанням показано на рис. 5, де G1 - джерело живлення на 12 В; VT1, 2 – силові польові транзистори, N-канал з ізольованим затвором; VT3,4 – силові польові транзистори, P-канал з ізольованим затвором; VT5-9 – керуючі малопотужні транзистори з ізольованим затвором; G2,3 – виконують роль ніжок мікроконтролера, задають логічні рівні; G4 – ніжка мікроконтролера формує PWM, (широтно-імпульсну модуляцію); G5, L1, C1, R8 – виконують роль еквівалентного заміщення двигуна постійного струму; D1-4 – допоміжні діоди Шотки; R1-7 – резистори.

Розроблена схема дозволяє використовувати всього три ніжки мікроконтролера для керування двигуном в реверсивному режимі. Дві ніжки логічних рівнів G2 і G3 відповідають за напрямок обертання двигуна, і одна G4 задає ШІМ сигнал. Також підтримується можливість примусового гальмування двигуна.

Як видно з графіків, середній струм в керуючому транзисторі не великий близько 38 мА. Але кидки в момент включення (для заряду ємності силового транзистора) досягають 1,4 А.

Моделювання схеми ілюструє, що найбільша напруга на стоці-витоку керуючого транзистора досягається на вимкненому транзисторі в момент роботи схеми, та дорівнює напрузі джерела живлення $G1 = V_{dss} = 12 \text{ В}$. Результати приведені на рисунках 6 та 7.

Напруга на затворі транзистора надходить з мікроконтролера і дорівнює 5 В. Чим менше ємність на затворі, тим менше струму необхідно для включення і відключення транзистора. Рисунок 8 ілюструє перебіг струму на ніжці контролера. Амплітудне значення досягає 70 мА, поточне – 1,8 мА. Керуюча частина включає в себе мікроконтролер STM32F103C8T6, а інтерфейсна частина складається з плати NodeMCU (Wi-Fi модуля), модуля MicroSD карти, блоку керування інтерфейсом, LCD 16x2 та I2C перетворювача.

Інтернет речей є однією з найбільш популярних областей в світі технологій. Фізичні об'єкти і цифровий світ пов'язані зараз як ніколи. Пам'ятаючи про це, компанія Espressif Systems випустила мікроконтролер з підтримкою Wi-Fi, ESP8266. За допомогою якого можна контролювати і керувати пристроєм з будь-якої точки світу, де є вихід до інтернету. На платі встановлено контролер USB-UART на основі мікросхеми CH340, який перетворює USB-сигнал на послідовний і дозволяє комп'ютеру програмувати та взаємодіяти з мікросхемою ESP8266. Крім того, ESP8266 містить вбудований приймач Wi-Fi 802.11b / g / n HT40, тому він може не тільки підключатися до мережі Wi-Fi і взаємодіяти з інтернетом, а й встановлювати власну мережу, дозволяючи іншим пристроям підключатися безпосередньо до нього.

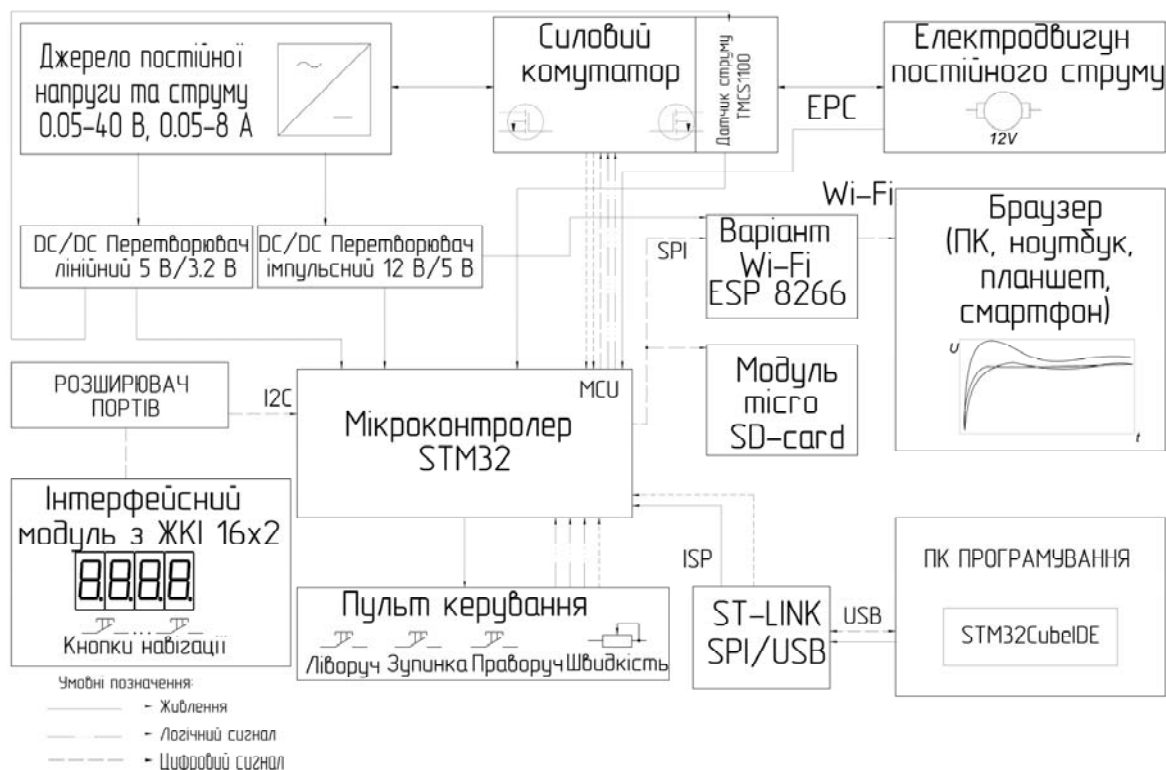


Рисунок 4. Схема електрична функціональна лабораторного стенду

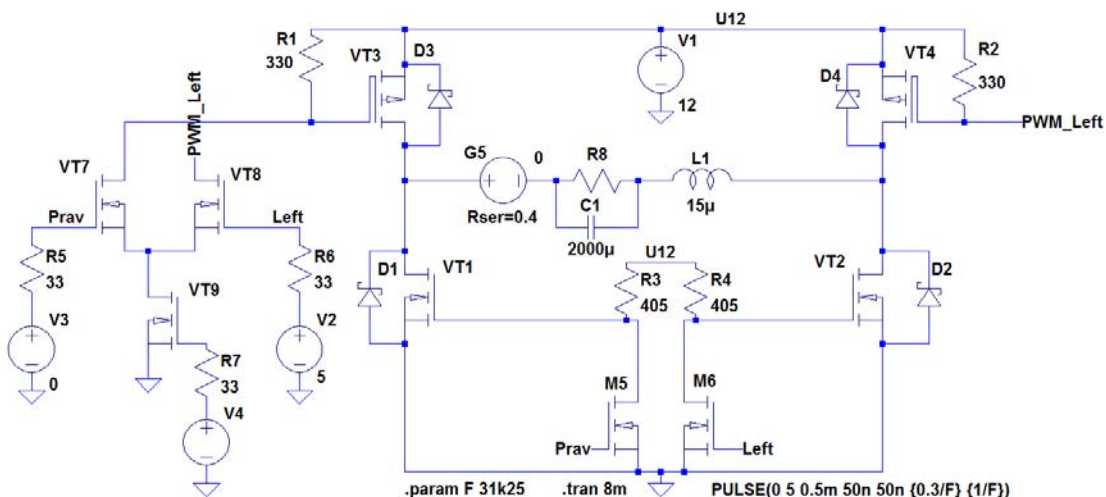


Рисунок 5. Модель схеми керування двигуном постійного струму з реверсивним обертанням

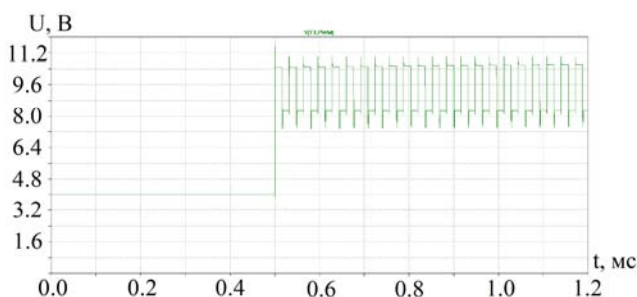


Рисунок 6. Напряга стоку-витоку керуючого транзистора.

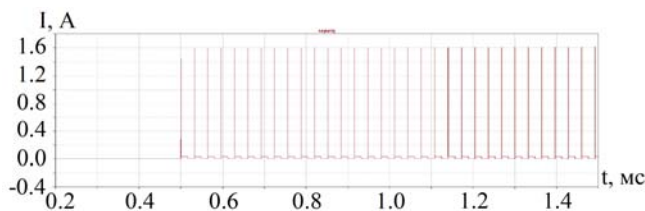


Рисунок 7. Струм стоку-витоку керуючого транзистора.

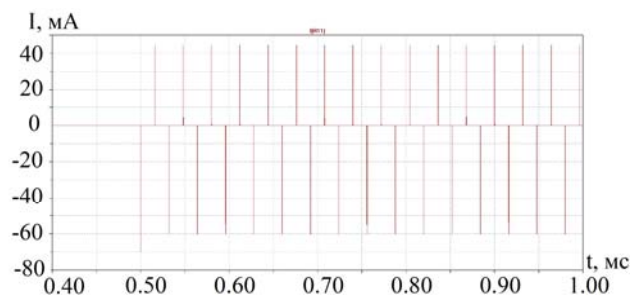


Рисунок 8. Протікання струму з ніжки мікроконтролера при ШІМ 50%.

Оскільки діапазон робочої напруги ESP8266 становить від 3 В до 3,6 В, плата поставляється з регулятором напруги, який підтримує постійну напругу на

рівні 3,3 В. Для програмування ESP8266 було обрано Arduino IDE.

Для того щоб зменшити кількість зайнятих портів на мікроконтролері STM32F103C8T6 було прийнято рішення встановити мікросхему PCF8574AT. Спеціально для дисплея, є модуль-перехідник на основі мікросхеми PCF8574AT, яка призначена для розширення кількості ліній введення/виведення. Мікросхема підключається по I2C інтерфейсу і надає розширення розміром у порт з 8 ліній введення/виведення.

При включенні стенду на мікроконтролерах STM32F103C8T6 та ESP8266 проводиться ініціалізація і налаштування всіх необхідних апаратних ресурсів, а також входів-виходів та встановлення необхідних змінних. Загальний алгоритм зображено на рисунку 9.

Далі виконуються по відповідним запитам переривання такі процеси як, обслуговування панелі керування приводом, інтерфейсної панелі та роботи Wi-Fi модуля. Керування двигуном виконується за допомогою панелі з органами прямого керування приводом. Якщо є натискання будь-якої кнопки з панелі керування, то виконується операція в залежності від призначення кнопки. Потім відповідні сигнали подаються через мікропроцесор на блок керування двигуном, згідно структурної схеми системи керування, яка отримує данні зі зворотних зв'язків по ЕРС та по струму. В залежності від завдання по швидкості та коефіцієнтів ПІД-регуляторів змінюється ШІМ живлення двигуна.

Регулювання ПІД складових виконується з інтерфейсної панелі. Якщо є натискання кнопок навігації інтерфейсної панелі, то відповідно від кнопки виконуємо перехід на наступне меню або на наступний рядок поточного меню.

Спочатку виконується ініціалізація панелі керування приводом, тобто виконується налаштування

обраних портів мікроконтролера на отримання даних від кнопок. Далі очікується натискання кнопок керування. В залежності від кнопки, виконується переривання з наступними операціями. Алгоритм керування двигуном зображено на рисунку 10.

Перший пріоритет має кнопка «Стоп». При її натисканні зупиняється формування ШІМ сигналу та знімається завдання керування приводом. Другий пріоритет має кнопка «Вперед». При натисканні встановлюється завдання на ввімкнення двигуна в напрямку по часовій стрілці зі швидкістю, яку встановили за допомогою потенціометра, який регулює завдання по швидкості. Третій пріоритет має кнопка «Назад». При натисканні встановлюється завдання на ввімкнення двигуна в напрямку проти часової стрілки зі швидкістю, яку встановили за допомогою потенціометра.

З боку Wi-Fi модуля спочатку виконується його ініціалізація, тобто налаштування IP, MAC, DNS адресів, назви мережі та частоти оновлення сервера.

Після налаштування Wi-Fi модуля, відбувається ініціалізація модуля microSD картки, налаштування зовнішнього вигляду веб-сторінки, перевірки всіх директорій, в яких знаходяться необхідні документи. Потім виконується перевірка запитів на зв'язок з користувачем, де використовується заикнення на очікування запиту. Якщо є запит, то зчитується масив інформації з microSD картки, та формується вміст сторінки. Далі відбувається перевірка на закінчення

масиву даних, якщо перевірка не пройшла успішно, то відбувається повернення до зчитування масиву інформації з microSD картки. Якщо перевірка пройшла успішно, то закривається передача даних і зберігається інформація. Потім виконується обробка даних та передача їх по запиту. Далі відбувається перевірка з'єднання з користувачем, якщо користувач ще присутній, то відбувається повернення до зчитування масиву інформації з microSD картки. Якщо користувача вже немає, то завершується передача даних. Алгоритм інтерфейсу зв'язку стенду з комп'ютером показано на рисунку 11 у вигляді блок схеми.

На останньому варіанті системи в якості Wi-Fi модуля була задіяна плата NodeMCU, яка оснащена модулем ESP-12E з антеною 2,4 ГГц. У цій платі використовується функція мультиплексування портів - це означає, що один вивід GPIO може діяти як ШІМ/UART/SPI. NodeMCU має в цілому 17 портів GPIO, виведених на роз'єми з обох сторін плати. Ці порти можуть використовуватися для виконання різних периферійних завдань. На платі встановлено контролер USB-UART на основі мікросхеми CH340, який перетворює USB-сигнал на послідовний і дозволяє комп'ютеру програмувати та взаємодіяти з мікросхемою ESP-12E. STM 32 CubeIDE це універсальний інструмент розробки для декількох ОС, який є частиною програмної екосистеми STM 32 Cube MX.

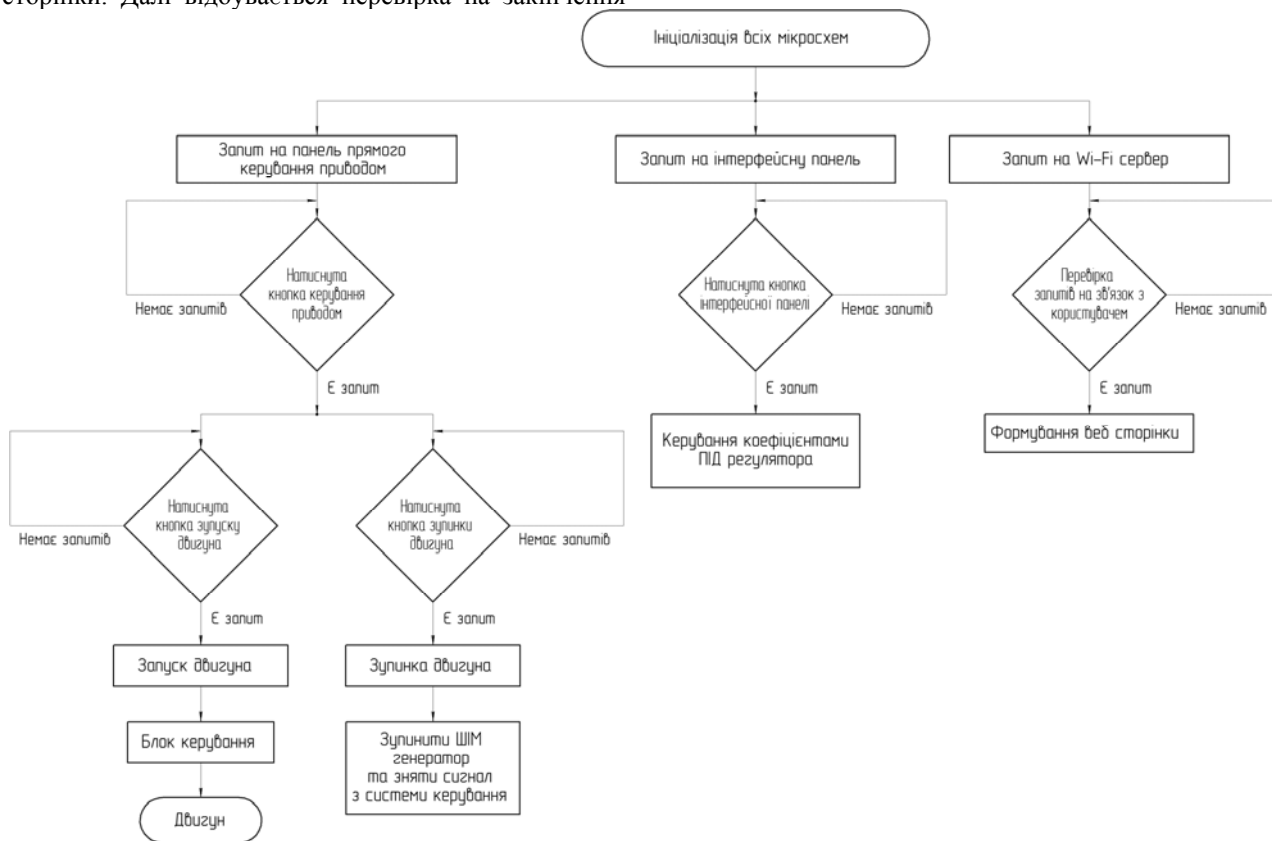


Рисунок 9. Загальний алгоритм роботи стенду

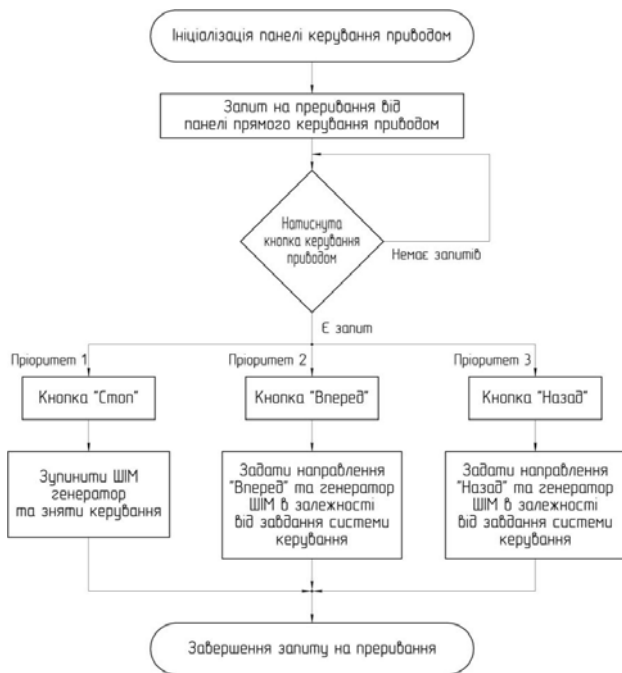


Рисунок 10. Алгоритм керування двигуном

Вдосконалена платформа для розробки на мовах C/C++ з периферійною конфігурацією, генерацією коду, компіляцією коду та функціями налагодження для мікроконтролерів STM 32. Модуль LCD Keypad Shield 1602 є платою з вбудованими модулями індикації і керування. Індикація здійснюється за допомогою LCD дисплея HD 44780, а керування через вбудовані кнопки. Щоб підключити дисплей до мікроконтролера можна використовувати всі лінії введення/виведення, тобто через 8 бітний інтерфейс, але для цього буде потрібна значна кількість портів мікроконтролера. Можна скоротити кількість портів, якщо переключитися на 4 бітний інтерфейс. У цьому випадку 1 байт даних передається за два тактових імпульси, спочатку старші 4 біти, а потім молодші.

Для роботи з екраном використовуються кнопки, які вмонтовані в модуль. В стандартному модулі 5 кнопок для визначення натискання вони підключені до аналогового піну A0, а кнопка RST має свій окремий пін. Для того, щоб мінімізувати кількість зайнятих портів на мікроконтролері та збільшити функціонал аналогового піну A0, до 6 кнопок, було додатково встановлено резистор на 1 кОм між контактами кнопок RST та SELECT. Модуль перехідник. Для того щоб зменшити кількість зайнятих портів на мікроконтролері STM32F103C8T6 було прийнято рішення встановити мікросхему PCF8574AT. Спеціально для дисплея є модуль перехідник на основі мікросхеми PCF8574AT, яка призначена для розширення кількості ліній введення/виведення. Мікросхема підключається по I2C інтерфейсу і має порт з 8 ліній введення/виведення. Принцип функціонування простий, при записі байту даних в мікросхему, лінії порту приймають рівні, що відповідають значенням бітів отримано-

го байту Операція читання повертає байт даних, біти якого вказують стан ліній порту

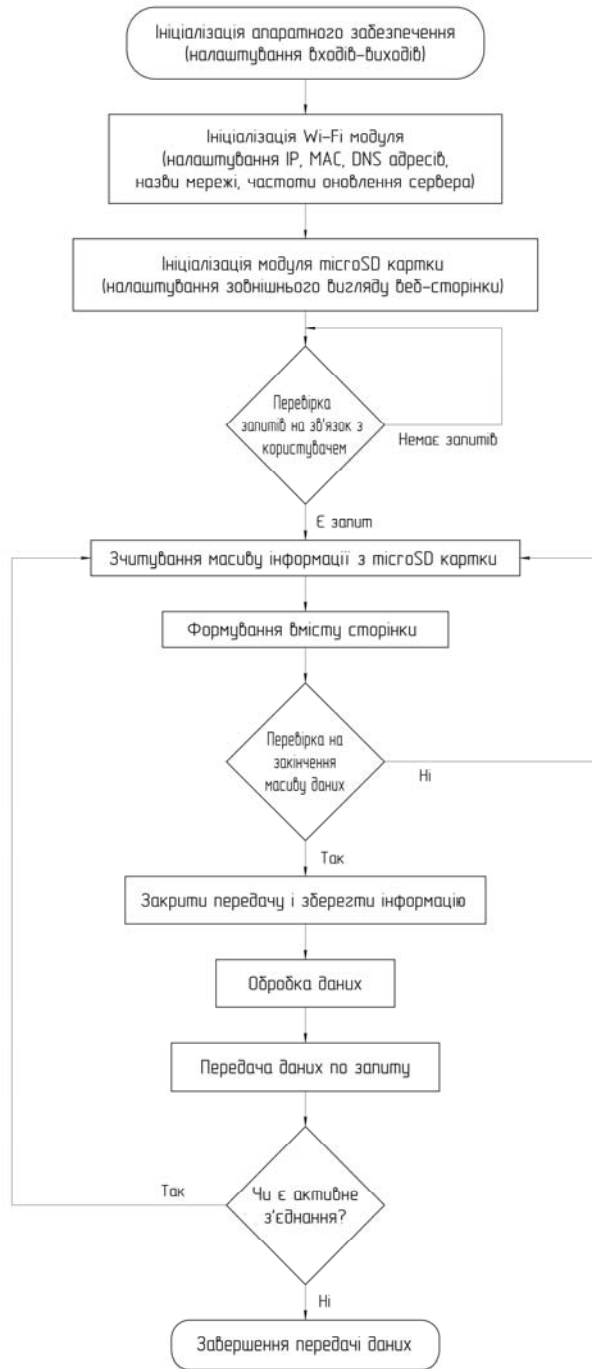


Рисунок 11. Алгоритм інтерфейсу зв'язку стенду з комп'ютером

Таким чином, мікросхема дозволяє розширити кількість ліній введення/виведення, використовуючи два біта керуючого порту.

Система живлення. В кінцевому варіанті стенду замість лабораторного блоку для його живлення використовується імпульсний блок на 12 В постійної напруги і максимальним струмом 10 А. Для ввімк-

нення плати NodeMCU, дисплея, I2C перетворювача, блоку керування інтерфейсом, модуля MicroSD карти необхідна напруга 5 В Цю напругу ми отримуємо шляхом перетворення 12 В до 5 В за допомогою понижуючого перетворювача на мікросхемі LM2596S. Для стабільної роботи мікроконтролера STM32F103C8T6 та для живлення датчика струму необхідна напруга в 3,3 В, отримуються шляхом перетворення 5 В до 3,3 В за допомогою другого понижуючого перетворювача.

Структурна схема замкненої системи автоматичного керування ДПС з ПІД-регуляторами струму та ЕРС показано на рисунку 12. За допомогою пульта керування варіювалася пропорційна, інтегральна та

диференційна складові ПІД-регуляторів.

Всі графіки були отримані на веб-сторінці в браузері через Wi-Fi. Для відображення даних було взято за основу веб-сторінку з фіксованою IP-адресою. Цей вибір був обґрунтований тим що, веб-сторінку можливо відкрити на смартфоні, планшеті, ноутбучі, персональному комп'ютері, як це зображено на рисунках 13 та 14. Тобто варіант є універсальним та найменш кропіткий в порівнянні з USB інтерфейсом.

Було проведено експерименти з імпульсним (рис. 15-17) та плавним (рис. 18-20) збільшенням швидкості двигуна та варіюванням складових ПІД-регулятора для кожного із них.

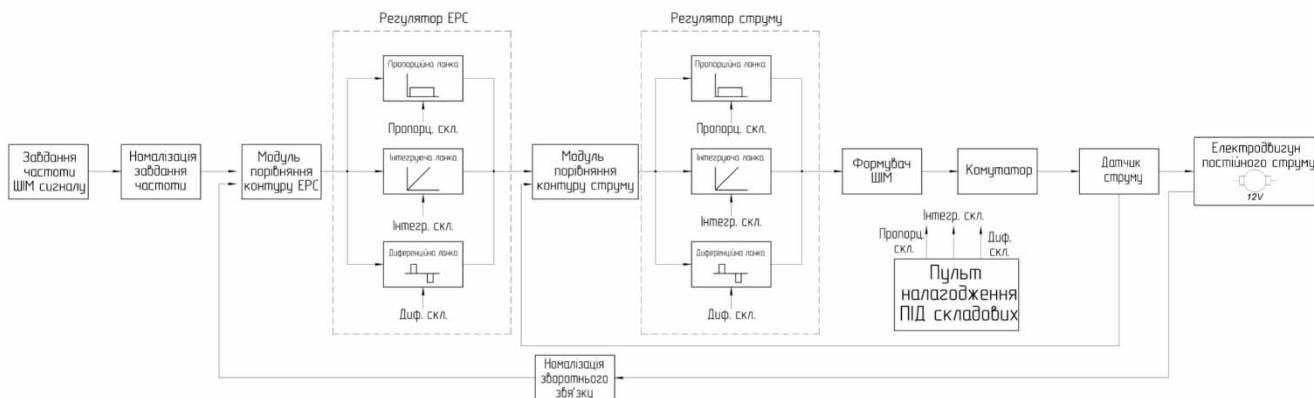


Рисунок 12. Структурна схема системи автоматичного керування з ПІД регуляторами струму та ЕРС

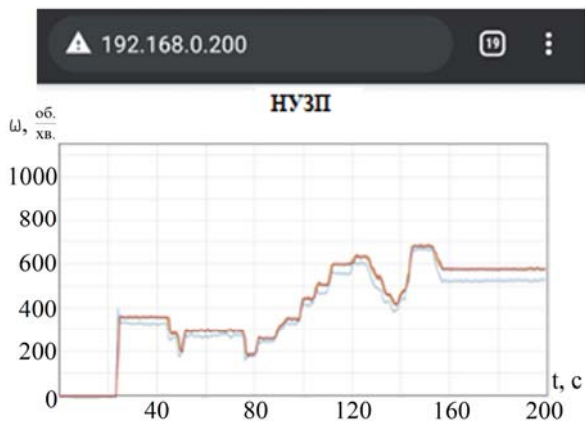


Рисунок 13. Графік системи на смартфоні

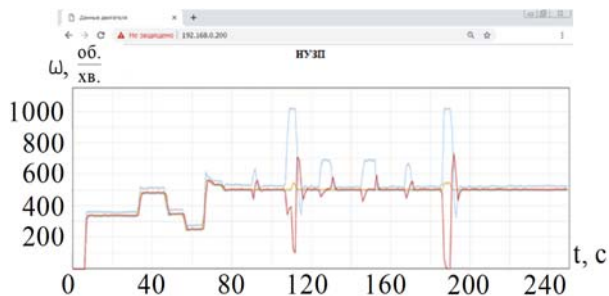


Рисунок 14. Графік системи на ПК

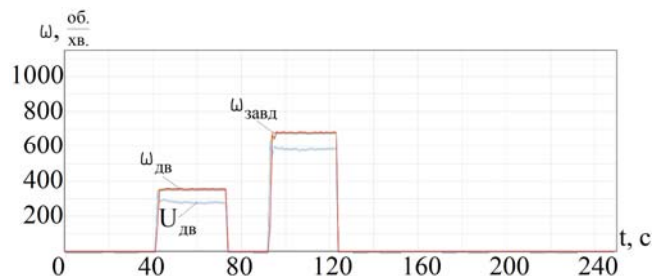


Рисунок 15. Перехідні процеси САК при $p=0,21$, $i=0,022$, $d=0,05$

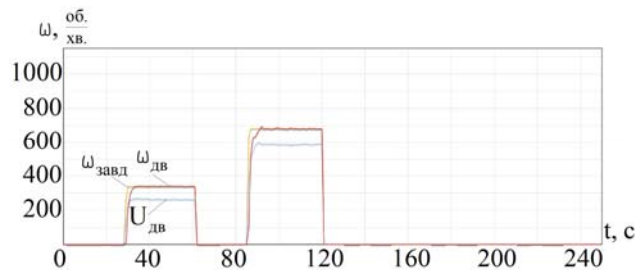


Рисунок 16. Перехідні процеси САК при $p=0,1$, $i=0,01$, $d=0,05$

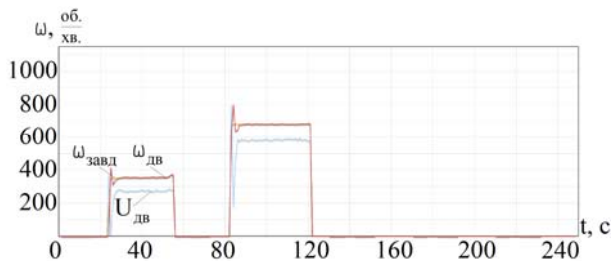


Рисунок 17. Перехідні процеси САК при $\rho=0,55$, $i=0,035$, $d=0,1$

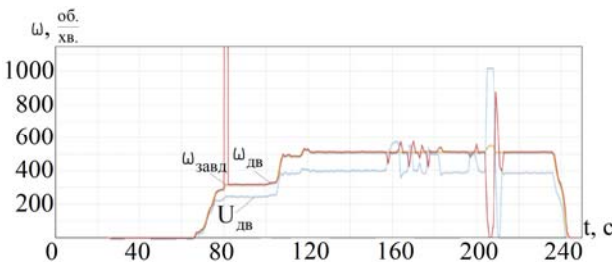


Рисунок 18. Перехідні процеси САК при $\rho=0,21$, $i=0,022$, $d=0,05$

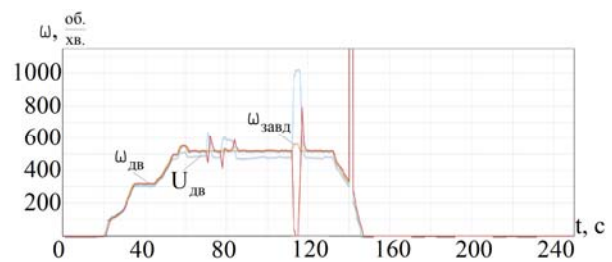


Рисунок 19. Перехідні процеси САК при $\rho=0,1$, $i=0,01$, $d=0,05$

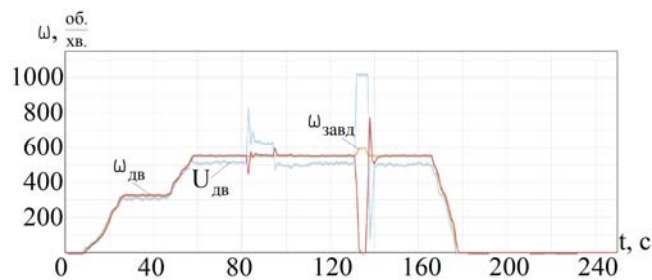


Рисунок 20. Перехідні процеси САК при $\rho=0,55$, $i=0,035$, $d=0,1$

Отже, за допомогою розробленого лабораторного стенда з бездротовим інтерфейсом було отримано результати експерименту при варіюванні складових ПІД-регулятора ЕРС замкненої системи автоматичного керування ДПТ. При цьому студенти мають можливість спостерігати онлайн вплив змін відповідних складових ПІД-регулятора на динаміку привода та зберігати графіки перехідних процесів САК для подальшого аналізу та додавання у звіти робіт.

V. ВИСНОВКИ

Розроблено лабораторний стенд з бездротовим інтерфейсом для вивчення роботи ДПС та проведення досліджень замкненої САК ДПС зі зворотнім зв'язком за ЕРС та ПІД-регулятором. Програмне забезпечення стенду дозволяє на основі знятих з ДПС даних відображати їх дистанційно у вигляді графіків на різних гаджетах (смартфоні, планшеті, ноутбучі, персональному комп'ютері) через Wi-Fi.

Для силового комутатора та системи керування був обраний мікроконтролер STM32F103C8T6, розроблена силова та керуюча плата для керування двигуном за допомогою ШІМ. Інформація, яка збирається зі стенду, зберігається в модулі microSD-card. Для дистанційної передачі поточних даних роботи двигуна до смартфона з виводом інформації на браузер було встановлено плату NodeMCU v3.

Використання цього лабораторного стенду у навчальному процесі розширить можливості вивчення електроприводу постійного струму та систем керування ним, а також дозволить студентам при вивченні будови самого стенду отримати знання про використання мікропроцесорних систем для збору, обробки сигналів та передачі даних через бездротовий інтерфейс.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Осадчий В. В. Лабораторный стенд для исследования микропроцессорных систем управления двухмассовым электроприводом / В. В. Осадчий, Е. С. Назарова, В. В. Брылистый, Р. И. Савилов // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2016. – № 22(98). – С. 33-38. <http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.22.98.2016.05>
- [2] Osadchyy V. Laboratory Stand for Investigation of Liquid Level Microprocessor Control Systems / V. Osadchyy, O. Nazarova // *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine. – 2020. – P. 1-4. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240868.
- [3] Назарова О. С. Ідентифікація кутової швидкості при завадах в оптичній системі енкодера / О.С. Назарова, В. В. Осадчий, І. А. Мелешко, М. О. Олейніков // *Вісник НТУ «ХПІ» - Харків*, 2019. – С.65-69. <http://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.16.12>
- [4] Sheremet O. I. Intelligent system based on a convolutional neural network for identifying people without breathing masks / O. I. Sheremet, O. Ye. Korobov, O. V. Sadovoi, Yu. V. Sokhina // *Applied Aspects of Information Technology*, 2020. - Vol.3. - No.3. - P. 133–134. DOI: 10.15276/aait.03.2020.2
- [5] Chornyi O.P. A virtual complex with the parametric adjustment to electromechanical system parameters / O.P. Chornyi, S.A. Serhiienko // *Tekhnichna elektrodynamika*, 2019. - No 1. - P. 38–41. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.038>

- [6] Nazarova O. Computer Modeling of Multi-Mass Electromechanical Systems / O. Nazarova // The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), 2020. - Vol. 2608. - P. 489-498.
- [7] Berestinov A. A. Development of a Laboratory Stand to Study of Industrial Protocols / A. A. Berestinov, A. S. Nesterov and A. Z. Kulganatov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. – 2020. - P. 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111994.
- [8] Broisin J. A remote laboratory to leverage motivation of learners to practice: An exploratory study about system administration / J. Broisin, R. Venant and P. Vidal // Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Bangkok, Thailand. – 2015. - P. 140-142. doi: 10.1109/REV.2015.7087280.
- [9] Alszer S. Modular, didactic flexible manufacturing system — Case study / S. Alszer and J. Krystek // 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Auckland. – 2018. - P. 121-125. doi: 10.1109/ICCAR.2018.8384655.
- [10] Levinzon S. V. Use of the modern stand equipment in the educational process in the course «electrical engineering» / S. V. Levinzon, N. V. Tsarkova, D. V. Melnikov // 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj-Napoca, Romania. – 2014. - P. 1-4. doi: 10.1109/UPEC.2014.6934714.
- [11] Osses F. Remote laboratory for position control using a Quanser Servo SRV02 operated via Moodle / F. Osses, R. Ortega, C. Muñoz-Poblete // 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Concepcion. – 2018. - P. 1-6. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609733.
- [12] Eliot N. A Flexible Laboratory Environment Supporting Honeypot Deployment for Teaching Real-World Cybersecurity Skills / N. Eliot, D. Kendall and M. Brockway // IEEE Access, 2018. - Vol. 6. - P. 34884-34895. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2850839.
- [13] Abdulov A. Remote Laboratory to Study Mobile Robot Odometry / A. Abdulov and A. Abramenkov // 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Moscow, Russia, 2017. – P. 1-4. doi: 10.1109/AICT.2017.8687067.
- [14] Arsirii Olena O. Information technology of supporting architectural solutions using polyglot persistence concept in learning management systems / Olena O. Arsirii, Maria G. Glava, Matthias Kolonko, Alina O. Glumenko // Applied Aspects of Information Technology, 2020. - Vol.3. - No.2. – P. 13–31. DOI: 10.15276/aait.02.2020.1
- [15] Kowalik R. New laboratory stand and teaching program — Transformer monitoring system / R. Kowalik, P. Kopański, K. Glik // 2010 Modern Electric Power Systems, Wroclaw, Poland, 2010. - P. 1-7.
- [16] Wojtulewicz A. Multiple-input multiple-output laboratory stand for process control education / A. Wojtulewicz, P. Chaber and M. Ławryńczuk // 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, Poland, 2016. - P. 466-471. doi: 10.1109/MMAR.2016.7575180.
- [17] Michaeli L. Remote access cost effective measurement stand for teaching basic electronic circuits / L. Michaeli, M. Godla and J. Šaliga // Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, Prague, Czech Republic, 2011.- P. 188-191. doi: 10.1109/IDAACS.2011.6072737.
- [18] Antipin A. S. Electroenergetical training laboratory with remote access to stands / A. S. Antipin, V. E. Frizen, V. N. Udintcev and S. L. Nazarov // 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, 2017. - P. 170-173. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955425.
- [19] Asumadu J. A. A Web-based electrical and electronics remote wiring and measurement laboratory (RwmLAB) instrument / J. A. Asumadu et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005. - Vol. 54. - No. 1, pp. 38-44, Feb., doi: 10.1109/TIM.2004.834597.
- [20] Abid R. Comparative study of the performances of the DC/DC Luo-converter in photovoltaic applications / R. Abid, F. Masmoudi and N. Derbel // 2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C), Sfax, 2017. - P. 117-122. doi: 10.1109/SM2C.2017.8071831.
- [21] Ostroverkhov M. Output Voltage Stabilization Process Simulation in Generator with Hybrid Excitation at Variable Drive Speed / M. Ostroverkhov, V. Chumack and E. Monakhov // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019. - P. 310-313. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879781
- [22] Kulynych E.M. Laboratory stand with wireless interface for study of automatic control systems of dc electric drive / E.M. Kulynych, O.S.Nazarova, D.V. Goncharov, S.G. Chernyshev // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2020», (Одеса, 22 - 23 жовтня 2020 р.) / Одеська нац. акад. харч. технологій. – Одеса: ОНАХТ, 2020. – С. 86-88.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2020

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД С БЕСПРОВОДНЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

- КУЛИНИЧ Э.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: kuliniched@gmail.com;
- НАЗАРОВА Е.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: nazarova16@gmail.com;
- ГОНЧАРОВ Д.В. магистр кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: nicksonszp@gmail.com
- ЧЕРНИШЕВ С.Г. магистр кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: flashboy811@gmail.com
- ПИСКУН В.В. студент группы Е-317 кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: vlad.piskun.2000@gmail.com

Цель работы. Разработка лабораторного стенда с беспроводным интерфейсом для изучения и исследования систем автоматического управления электроприводами постоянного тока.

Методы исследования. Физический эксперимент на разработанном лабораторном стенде, компьютерное моделирование, расчетно-аналитический методы.

Полученные результаты. В ходе исследования были рассмотрены и проанализированы преимущества и недостатки существующих разработок лабораторных стендов с виртуальной и дистанционной составляющей, возможностью организации беспроводного интерфейса, с учетом экономичности, мобильности, надежности и простоты исполнения, а также возможности использования в качестве учебного стенда. Разработано подключение стенда с помощью USB и Wi-Fi. Для силового коммутатора и системы автоматического управления использован микроконтроллер STM32F103C8T6. Интерфейсная часть состоит из платы NodeMCU, модуля MicroSD карты, блока управления интерфейсом, LCD 16x2 и I2C преобразователя. Для передачи информации и программирования стенда применен интерфейс UART - USB. Предусмотрена возможность текущей дистанционной передачи информации о режимах и параметры работы двигателя к компьютеру с выводом на браузер путем установки модуля Wi-Fi ESP8266MOD. Разработана замкнутая система автоматического управления двигателем постоянного тока с ПИД-регуляторами тока и ЭДС. Были проведены эксперименты с импульсным и плавным увеличением скорости двигателя и варьированием составляющих ПИД-регуляторов с помощью пульта управления. Все графики результатов эксперимента были получены на веб-странице с фиксированным IP-адресом в браузере через Wi-Fi.

Научная новизна. Предложена и разработана структура системы дистанционного мониторинга и управления на основе аппаратно-программного совмещения телекоммуникационной и измерительной систем, которая отличается от существующих наличием текущей беспроводной передачи информации, позволяет дистанционно получать данные исследований систем автоматического управления двигателем постоянного тока.

Практическая ценность. Разработанный лабораторный стенд с беспроводным интерфейсом позволяет дистанционно получать и хранить экспериментальные данные о параметрах исследуемого двигателя в режиме реального времени.

Ключевые слова: лабораторный стенд; беспроводной интерфейс; микроконтроллер; система автоматического управления; электропривод; постоянный ток.

LABORATORY STAND WITH WIRELESS INTERFACE FOR INVESTIGATION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF DC ELECTRIC DRIVES

- KULYNYCH E.M. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department "Electric drive and automation of industrial equipment" of the National University

- “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kuliniched@gmail.com;
- NAZAROVA O.S. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the department “Electric drive and automation of industrial equipment” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nazarova16@gmail.com;
- GONCHAROV D.V. Master of the department “Electric drive and automation of industrial equipment” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nicksonszp@gmail.com
- CHERNYSHEV S.G. Master of the department “Electric drive and automation of industrial equipment” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: flashboy811@gmail.com
- PISKUN V.V. Student of the group E-317 of the department “Electric drive and automation of industrial equipment” of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vlad.piskun.2000@gmail.com

Purpose. Development of a laboratory stand with a wireless interface for the study and research of automatic control systems for DC electric drives.

Methodology. Physical experiment on the developed laboratory bench, computer modelling, calculation and analytical methods.

Findings. The study considered and analyzed the advantages and disadvantages of existing developments of laboratory stands with virtual and remote components, the possibility of organizing a wireless interface, taking into account cost-effectiveness, mobility, reliability and simplicity, as well as the possibility of using as a training stand. The connection of the stand by means of USB and Wi-Fi is developed. The STM32F103C8T6 microcontroller is used for the power switch and the automatic control system. The interface part consists of a NodeMCU board, a MicroSD card module, an interface control unit, a 16x2 LCD and an I2C converter. The UART-USB interface is used for information transfer and programming of the stand. The possibility of current remote transmission of information about the modes and parameters of the engine to a computer with a browser output by installing the Wi-Fi module ESP8266MOD. A closed system of automatic DC motor control with PID current regulators and EMF has been developed. Experiments were performed with a pulse and smooth increase in motor speed and variation of the components of the PID controllers using the control panel of the laboratory stand. All graphs of the results of the experiment were obtained on a web page with a fixed IP address in the browser via Wi-Fi.

Originality. The structure of the remote monitoring and control system based on hardware and software combination of telecommunication and measuring systems is proposed and developed, which differs from the existing ones by the presence of current wireless transmission of information, which allows to remotely receive research data of automatic DC motor control systems.

Practical value. The developed laboratory stand with the wireless interface allows to receive and store experimental data on parameters of the investigated engine in real time remotely.

Keywords: laboratory stand; wireless interface; microcontroller; automatic control system; electric drive; direct current.

REFERENCES

- [1] Osadchyy, V. V., Nazarova, E.S., Brylusty, V.V., Savilov, R.I. (2016). Laboratornyj stend dlja issledovanija mikroprocessornyh sistem upravlenija dvuhmassovym jelektroprivodom [Laboratory stand for research of microprocessor control systems of two-mass electric drive]. Elektrotehnicni ta komp'juterni sistemi, № 22(98), 33-38. <http://dx.doi.org/10.15276/eltecs.22.98.2016.05>
- [2] Osadchyy V., Nazarova O. (2020). Laboratory Stand for Investigation of Liquid Level Microprocessor Control Systems. 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240868.
- [3] Nazarova, O.S., Osadchyy, V.V., Meleshko, I.A., Oleinikov, M.O. (2019). Identifikacija kutovoi shvidkosti pri zavadah v optichnij sistemi enkodera [Identification of angular velocity in case of interference in the optical system of the encoder]. Visnik NTU «KhPI», Kharkiv, 65-69. <http://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.16.12>
- [4] Sheremet, O. I., Korobov, O. Ye., Sadovoi, O. V., Sokhina, Yu. V. (2020). Intelligent system based on a convolutional neural network for identifying people without breathing masks. Applied Aspects of Information Technology, Vol.3 No.3, 133-134. DOI: 10.15276/aait.03.2020.2
- [5] Chorny, O.P., Serhienko, S.A. (2019). A virtual complex with the parametric adjustment to electromechanical system parameters. Tekhnichna elektrodynamika, No 1, pp. 38-41. doi: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.01.038>
- [6] Nazarova, O. Computer Modeling of Multi-Mass Electromechanical Systems. The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Vol. 2608, 489-498.
- [7] Berestinov, A. A., Nesterov, A. S., Kulganatov, A.Z. (2020). Development of a Laboratory Stand to Study of Industrial Protocols. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and

- Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111994.
- [8] Broisin, J., Venant, R., Vidal, P. (2015). A remote laboratory to leverage motivation of learners to practice: An exploratory study about system administration," Proceedings of 2015 12th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), Bangkok, Thailand, 140-142, doi: 10.1109/REV.2015.7087280.
- [9] [9] Alszer, S., Krystek, J. (2018). Modular, didactic flexible manufacturing system — Case study. 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), Auckland, 121-125. doi: 10.1109/ICCAR.2018.8384655.
- [10] Levinzon, S. V., Tsarkova, N. V., Melnikov, D. V., (2014). Use of the modern stand equipment in the educational process in the course «electrical engineering». 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj-Napoca, Romania, 1-4. doi: 10.1109/UPEC.2014.6934714.
- [11] Osses, F., Ortega, R., Muñoz-Poblete C. (2018). Remote laboratory for position control using a Quanser Servo SRV02 operated via Moodle. 2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Concepcion, 1-6. doi: 10.1109/ICA-ACCA.2018.8609733.
- [12] Eliot, N., Kendall, D., Brockway, M. (2018). A Flexible Laboratory Environment Supporting Honey-pot Deployment for Teaching Real-World Cybersecurity Skills, IEEE Access, vol. 6, 34884-34895, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2850839.
- [13] Abdulov, A., Abramenkov, A., (2017). Remote Laboratory to Study Mobile Robot Odometry. 2017 IEEE 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Moscow, Russia, 1-4. doi: 10.1109/ICAICT.2017.8687067.
- [14] Arsirii, Olena O., Glava, Maria G, Kolonko, Matthias, Glumenko, Alina O. (2020). Information technology of supporting architectural solutions using polyglot persistence concept in learning management systems. Applied Aspects of Information Technology, Vol.3, No.2, 13–31. DOI: 10.15276/aait.02.2020.1
- [15] Kowalik, R., Kopański, P., Glik, K. (2010). New laboratory stand and teaching program — Transformer monitoring system. 2010 Modern Electric Power Systems, Wrocław, Poland, 1-7.
- [16] Wojtulewicz, A., Chaber, P., Ławryńczuk, M. (2016). Multiple-input multiple-output laboratory stand for process control education. 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, Poland, 466-471. doi: 10.1109/MMAR.2016.7575180.
- [17] Michaeli, L., Godla, M., Šaliga, J. (2011). Remote access cost effective measurement stand for teaching basic electronic circuits. Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, Prague, Czech Republic, 188-191. doi: 10.1109/IDAACS.2011.6072737.
- [18] Antipin, A. S., Frizen, V. E., Udintcev, V. N., Nazarov, S. L. (2017). Electroenergetical training laboratory with remote access to stands. 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Sofia, 170-173. doi: 10.1109/ELMA.2017.7955425.
- [19] Asumadu, J. A. et al. (2005). A Web-based electrical and electronics remote wiring and measurement laboratory (RwmLAB) instrument. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 54, no. 1, 38-44. doi: 10.1109/TIM.2004.834597.
- [20] Abid, R., Masmoudi, F., Derbel, N. (2017). Comparative study of the performances of the DC/DC Luo-converter in photovoltaic applications. 2017 International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities (SM2C), Sfax, 117-122, doi: 10.1109/SM2C.2017.8071831.
- [21] Ostroverkhov, M., Chumack, V., Monakhov, E., (2019). Output Voltage Stabilization Process Simulation in Generator with Hybrid Excitation at Variable Drive Speed. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 310-313. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879781
- [22] Kulynych, E.M., Nazarova, O.S., Goncharov, D.V., Chernyshev, S.G. (2020). Laboratory stand with wireless interface for study of automatic control systems of dc electric drive. XIII Mizhnarodna naukovopraktichna konferencija "Informacijni tehnologii i avtomatizacija – 2020", Odesa: ONAHT, 86-88.